

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра РАДІОІНЖЕНЕРІЇ

«На правах рукопису»
УДК 621.396.96

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«_17_» _____ 12_ _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою


«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

зі спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

на тему: « Металодетектор на основі датчика магнітного поля »

Виконав студент II курсу, групи PI-41мп

Лавренчук Юрій Олександрович
(прізвище, ім'я, по-батькові)


(підпис)

Науковий керівник:

к.т.н., доцент Мартинюк Сергій Євстафійович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Рецензент:

к.т.н., доцент Мовчанюк Андрій Валерійович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент 

Київ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**


РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
спеціальність 172 “Електронні комунікації та радіотехніка”
Освітньо-професійна програма “ **Інформаційна та комунікаційна
радіоінженерія**”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РІ

 Сергій ЛІТВІЦЕВ_

«_08_»__09__2025 року

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Лавренчук Юрій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Металодетектор на основі датчика магнітного поля
науковий керівник дисертації

Мартинюк Сергій Євстафійович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом по університету від «11»11 2025 р. № 4895-с

2. Термін подання студентом дисертації 17 грудня 2024 року

3.Об'єкт дослідження: Металодетектор на основі датчика магнітного поля

4.Вихідні дані: Локальний магнітометричний металодетектор радіусом пошуку 0,15-0,05 м для виявлення феромагнітних об'єктів

5.Перелік завдань, які потрібно розробити: Огляд основних типів металодетекторів, розробка схеми електричної принципової, виготовлення діючого макету та експериментальні дослідження магнітометричного металодетектора на основі триосьового датчика магнітного поля, а також аналіз його чутливості, точності та можливостей виявлення феромагнітних об'єктів.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: схема електрична металодетектора, трасування плати, результати експериментальних досліджень

7. Орієнтовний перелік публікацій:

8. Консультанти розділів дисертації: науково-педагогічні працівники радіотехнічного факультету.

9. Дата видачі завдання: 8.09.2025р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд та аналіз технічної літератури	до 15.09.2025	Виконано
2	Розрахунок та проектування	до 29.09.2025	Виконано
3	Дослідження експериментального	до 06.10.2025	Виконано
4	Моделювання 3D модель	до 20.10.2025	Виконано
5	Оформлення результатів	до 24.11.2025	Виконано
6	Підготовка презентації	до 15.12.2025	Виконано
7			
8			

Студент


(підпис)

Юрій ЛАВРЕНЧУК

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник


(підпис)

Сергій МАРТИНЮК

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми пояснюється тим, що пошук металевих об'єктів є важливим завданням у багатьох технічних та промислових сферах, таких як будівництво, технічна діагностика, охоронні системи, археологія, логістика, контроль якості продукції та побутові застосування. У більшості таких випадків необхідно визначити наявність та просторове розташування металевого об'єкта без прямого доступу до нього, наприклад, коли об'єкт прихований у ґрунті, стіні, під шаром ізоляції або не підлягає розбиранню. Для цього використовуються металодетектори різних конструкцій, що ґрунтуються на різних фізичних принципах.

Метою роботи є теоретичні та експериментальні дослідження характеристик металодетектора на основі зміни магнітного поля в присутності об'єктів із феромагнітних матеріалів.

Об'єкт дослідження — фізичні процеси зміни магнітного поля в присутності феромагнітних об'єктів.

Предмет дослідження — методи виявлення металів на основі аналізу локальних аномалій магнітного поля та похибок вимірювань.

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів та висновків. Повний обсяг дисертації складає 109 сторінок, в тому числі 86 сторінки основного тексту, 2 таблиць, 60 рисунків, 2 сторінки списку використаних джерел у кількості 19 найменувань, 3 додатків.

Ключові слова: *магнітометр, AMR сенсор, металодетектор, магнітна аномалія, QMC5883L, феромагнітні матеріали, CST Studio Suite, Beat Frequency Oscillator (BFO).*

ABSTRACT

The relevance of the topic is explained by the fact that the detection of metallic objects is an important task in many technical and industrial fields, such as construction, technical diagnostics, security systems, archaeology, logistics, quality control of products, and household applications. In most of these cases, it is necessary to determine the presence and spatial location of a metallic object without direct access to it, for example, when the object is hidden in soil, inside a wall, under a layer of insulation, or cannot be disassembled. For this purpose, metal detectors of various designs are used, which are based on different physical principles.

The aim of the work is to conduct theoretical and experimental studies of the characteristics of a metal detector based on changes in the magnetic field in the presence of objects made of ferromagnetic materials.

The object of the research is the physical processes of magnetic field variation in the presence of ferromagnetic objects.

The subject of the research is methods for metal detection based on the analysis of local magnetic field anomalies and measurement errors.

The dissertation consists of an introduction, five chapters, and conclusions. The total volume of the dissertation is 109 pages, including 86 pages of the main text, 2 tables, 60 figures, 2 pages of references comprising 19 sources, and 3 appendices.

Keywords: magnetometer, AMR sensor, metal detector, magnetic anomaly, QMC5883L, ferromagnetic materials, CST Studio Suite, Beat Frequency Oscillator (BFO).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1. ОГЛЯД АНАЛОГІВ.....	12
1.1 Детектори на основі биття частот.....	12
1.2 Низькочастотні індукційні детектори.....	13
1.3 Імпульсні металодетектори.....	15
1.4 Класифікація магнітометричних датчиків.....	17
2. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В МЕТАЛОЖЕТЕКТОРІ.....	19
2.1 Магнітне поле Землі як робочий сигнал.....	20
2.2 Взаємодія феромагнітного об'єкта з магнітним полем	21
2.3 Реакція магнітометра на магнітну аномалію.....	23
2.4 Чому магнітометр реагує лише на феромагнітні матеріали .	24
3. РОЗРОБКА	26
3.1 Проєктування корпусу магнітометричного металодетектора	32
4. ОГЛЯД МЕТАЛОДЕТЕКТОРА НА ОСНОВІ БИТТЯ ЧАСТОТ	36
4.1 Метод частотного биття в індукційних металодетекторах ..	38
4.2 Експериментальне дослідження частотної реакції металодетектора	39
5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	43
5.1 Джерела шумів магнітометра.....	44
5.1.1 Тепловий шум.....	44

5.1.2	Флікер-шум	45
5.1.3	Температурний дрейф	45
5.1.4	Кількісний шум АЦП	46
5.1.5	Електромагнітні перешкоди від електроніки	46
5.2	Похибки вимірювання	46
5.3	Представлення результатів.....	47
5.3.1	Залежність від відстані	50
5.3.2	Геометричний фактор.....	53
5.3.3	Фізичний фактор	53
5.4	Порівняння з теорією.....	53
5.4.1	Аналіз та порівняння з розрахунковими даними	54
5.4.2	Особливості чисельного моделювання магнітних аномалій у CST Studio Suite.	56
5.4.3	Порівняння з результатами моделювання в CST	57
5.4.4	Порівняння	65
5.5	Просторовий розподіл магнітної індукції	68
6.	ПОРІВНЯННЯ МАГНЕТОМЕТРІВ	71
6.1	Стійкість до завад	71
6.2	Конструктивна складність та практичність реалізації.....	72
6.3	Можливості аналізу сигналів	73
7.	ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ	77
7.1	Заміна датчика	77
7.1.1	LIS3MDL	77
7.1.2	ММС5983МА	78

7.1.3	RM3100.....	79
7.2	Застосування масиву датчиків	80
8.	ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛОДЕТЕКТОРУ	82
8.1	Контроль якості та неруйнівний контроль (NDT)	82
8.2	Виявлення прихованих металевих об'єктів у будівельних конструкціях	84
8.3	Використання у вибухонебезпечних середовищах.....	85
8.4	Аерокосмічна й оборонна галузь	86
8.5	Моніторинг магнітних завад у роботизованих системах	87
8.6	Застосування у гірничодобувній промисловості та геофізиці 89	
8.7	Контроль промислової безпеки.....	90
	ВИСНОВОК	92
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	94
	Додатку А	97
	Додатку Б.....	99
	Додатку Б.....	104

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

BFO — Beat Frequency Oscillator — Генератор частоти биття

VLF — Very Low Frequency — Металодетектор низької частоти

PI — Pulse Induction — Імпульсно-індукційний металодетектор

AMR — Anisotropic Magnetoresistance — Анізотропний магніторезистивний ефект

GMR — Giant Magnetoresistance — Гігантський магніторезистивний ефект

TMR — Tunneling Magnetoresistance — Тунельний магніторезистивний ефект

MEMS — Micro-Electro-Mechanical Systems — Мікроелектромеханічні системи

ОЦК — об'ємно-центрована кубічна

ГЦК — гранно-центрована кубічна

NDT — Non-Destructive Testing — Неруйнівний контроль

ВСТУП

Розвиток сучасних вимірювальних та пошукових технологій зумовлює зростаючий інтерес до методів безконтактного виявлення прихованих металевих об'єктів. У практичних умовах дедалі частіше виникає потреба локалізувати металеві елементи без порушення цілісності конструкцій або середовища, зокрема у будівельних спорудах, інженерних мережах, ґрунтах, технічних вузлах і виробках, що не підлягають розбиранню. Такі задачі характерні для технічної діагностики, неруйнівного контролю, інженерних вишукувань, систем безпеки та обслуговування інфраструктури.

Традиційні металодетектори, побудовані на індукційних або імпульсних принципах, забезпечують ефективне виявлення широкого спектра металів, однак їх використання супроводжується низкою обмежень. До них належать чутливість до електромагнітних завад, складність схемної реалізації, підвищене енергоспоживання та обмежені можливості аналізу фізичних властивостей об'єкта. У ряді прикладних задач ці фактори ускладнюють застосування класичних методів або роблять їх надмірними з погляду складності та вартості.

Альтернативним підходом є магнітометричний метод виявлення, що ґрунтується на реєстрації локальних викривлень природного магнітного поля, спричинених феромагнітними об'єктами. На відміну від активних індукційних систем, магнітометричні пристрої не формують власного зондуючого поля, а використовують геомагнітне поле Землі як стабільний природний сигнал. Це дозволяє реалізувати пасивний принцип детектування, зменшити енергоспоживання та підвищити стійкість до зовнішніх електромагнітних впливів.

Сучасні триосьові магнітометри, виконані за AMR/MEMS-технологією, поєднують достатню чутливість, малі габарити та цифровий інтерфейс, що робить їх придатними для створення компактних портативних металодетекторів. Використання таких сенсорів відкриває можливість детального аналізу просторової структури магнітних аномалій, а також дослідження впливу геометричних і фізичних параметрів феромагнітних об'єктів на результати вимірювань.

У даній магістерській дисертації розглянуто підхід до виявлення металевих об'єктів на основі аналізу змін магнітного поля з використанням триосьового магнітометра. Основну увагу приділено дослідженню чутливості методу, джерел похибок і шумів, а також порівнянню магнітометричного підходу з класичними індукційними металодетекторами. Отримані результати дозволяють оцінити практичні можливості та обмеження такого типу пристроїв і визначити напрями їх подальшого вдосконалення.

1. ОГЛЯД АНАЛОГІВ

Як правило, пристрої локального пошуку металевих об'єктів — компактні ручні детектори, що застосовуються для точного визначення положення цілі після її попереднього виявлення основною пошуковою системою. Залежно від фізичного принципу роботи сучасні моделі поділяються на три основні типи: прилади на основі биття частот, пристрої дуже низької частоти та імпульсно-індукційні системи. Кожен із цих методів базується на різних явищах електромагнітної індукції, що визначає чутливість, стійкість до завад, глибину виявлення та конструктивні особливості обладнання. У подальшому розділі детально розглянуто кожен із методів із прикладами поширених комерційних моделей.

1.1 Детектори на основі биття частот

Найпростішими з точки зору конструкції є металодетектори, що базуються на битті частоти. Їх принцип роботи базується на двох генераторах високих частот: стандартному та вимірювальному, що включає індуктивну котушку для пошуку. Остання є тою частотою, яка змінюється при появі металевого предмета в області дослідження.

Різниця частот генераторів створює сигнал, амплітуда якого варіюється пропорційно впливу об'єкта на котушку. Хоча ці детектори є простими, складаються з невеликої кількості елементів та дешеві, їх експлуатаційні можливості є дуже обмеженими. Вони мають похибки, що залежать від температури зовнішнього середовища, механічних вібрацій та нестабільності компонентів, що ускладнює тривалу експлуатацію. Глибина виявлення об'єктів обмежена лише кількома десятими метра, а нездатність розрізняти метали робить цю технологію малоефективною для професійного використання. Пристрої подібних схем застосовуються

як навчальні та демонстраційні моделі завдяки їхній доступності та наочному принципу роботи

В якості прикладу такої конструкції можна розглянути один з популярніших навчальних наборів (BFO Treasure Finder Kitha), показаний на рисунку 1.1. Він має типові властивості BFO-детекторів. Цей комплект працює в діапазоні частот 12-20 кГц і забезпечує пошук дрібних та середніх металевих об'єктів з різних матеріалів на глибині від 0,05 до 0,08 м. Його основними перевагами є простота налаштування, мінімальна кількість компонентів для збірки і можливість використовувати в лабораторних стендах для демонстрації частотних методів виявлення металів.



Рисунок 1.1 — Навчальний металодетектор на основі биття частот

1.2 Низькочастотні індукційні детектори

Ультранизькочастотні (very low frequency VLF) індукційні детектори працюють на основі зондуючого електромагнітного сигналу в діапазоні приблизно 5–20 кГц. У передавальній котушці формується слабе змінне магнітне поле, яке взаємодіє з металевими об'єктами. У результаті цієї взаємодії в металі виникають вихрові струми, що змінюють амплітуду, фазу та частково спектральний склад сигналу, який приймає детектор.

Саме аналіз цих змін дозволяє визначити наявність та приблизне розташування цілі.

Важливою перевагою приладів на основі цієї технології VLF є висока стабільність роботи та хороша роздільна здатність під час виявлення дрібних об'єктів. Проте такі пристрої мають і суттєві обмеження: вони чутливі до мінералізації ґрунту, вологості, солоної води та зовнішніх електромагнітних завад. У таких умовах частина енергії зондуючого сигналу поглинається середовищем, що зменшує точність визначення цілі та призводить до помилкових спрацювань.

До класичних представників пінпойнтерів цього типу належать Garrett Pro-Pointer AT (рис. 1.2) та Minelab Pro-Find 35 (рис. 1.3), які широко застосовуються як аматорами, так і професійними пошуковцями.

Garrett Pro-Pointer AT працює на основі низькочастотної індукційної технології VLF з робочою частотою близько 11,5 кГц. Пристрій забезпечує глибину виявлення дрібних металевих об'єктів у середньому 0.08–0.01 м, що робить його ефективним для точної локалізації монет, фрагментів металу та інших невеликих цілей. Модель вирізняється стабільною роботою в різних умовах, має водозахищений корпус, здатний витримувати занурення до 3 метрів, а також оснащена звуковою та вібраційною індикацією, можливістю регулювання чутливості та функцією точнішої локалізації цілі.



Рисунок 1.2 — Пінпойнтер Garrett Pro-Pointer

Завдяки цьому Garrett Pro-Pointer AT вважається універсальним інструментом для пошуку металевих об'єктів як на суші, так і у воді.

Minelab Pro-Find 35 також базується на технології VLF та працює на частоті приблизно 12–13 кГц, забезпечуючи глибину виявлення монетоподібних об'єктів до 0.01–0.012 м. Однією з ключових особливостей цієї моделі є система “Ferrous Tone ID”, яка дає змогу відрізнити чорні метали за характером звукового сигналу, що суттєво підвищує ефективність пошуку. Пристрій має покращену завадостійкість, підтримує як аудіо-, так і віброіндикацію, а також вологостійкий корпус, що дозволяє працювати у складних умовах, включно з підвищеною вологістю та мокрим ґрунтом. Завдяки цим властивостям Minelab Pro-Find 35 забезпечує точну локалізацію цілей і зручність використання навіть у складних польових умовах.



Рисунок 1.3 — Пінпойнтер Minelab Pro-Find 35

1.3 Імпульсні металодетектори

Імпульсні металодетектори локального пошуку працюють на основі принципово відмінного від індукційних методів фізичного підходу. У передавальну котушку подається короткий імпульс високого струму, який створює потужне, але дуже короткочасне магнітне поле. Після відключення живлення в металевому об'єкті формуються вихрові струми,

що затухають із характерною часовою константою, а електронна частина вимірює зміну сигналу саме у часовій області. Такий підхід дозволяє ефективно виявляти цілі навіть у складних середовищах, де інші принципи втрачають точність.

Однією з основних переваг технології імпульсних металодетекторів є виняткова стійкість до мінералізації ґрунту. Оскільки мінерали та породи не створюють тривалої вихрової відповіді, імпульсний метод майже не реагує на неоднорідності середовища. Завдяки цьому пристрої на основі імпульсної індукції успішно працюють у солоній воді, на піску з високим вмістом оксидів, у гірських породах і навіть у районах із великою кількістю металобрухту, де інші технології часто дають хибні сигнали.

Імпульсна технологія зазвичай забезпечує більш стабільний сигнал і трохи більшу глибину виявлення для компактних портативних конструкцій. Разом з тим, такі пристрої мають вищу енерговитратність, складнішу електронну частину та не здатні здійснювати дискримінацію металів, тобто визначати тип матеріалу.

Серед найбільш відомих представників цієї технології можна виділити Deteknix XPointer PI (рис. 1.4) та White's Bullseye TRX (рис. 1.5).

Deteknix XPointer PI використовує імпульсну послідовність частотою приблизно 100–300 кГц і забезпечує глибину виявлення невеликих металевих об'єктів до близько 0.012 м. Пристрій демонструє високу стабільність роботи та впевнено поводить ся в умовах значної мінералізації чи електромагнітних завад, що робить його ефективним для використання на складних ґрунтах.



Рисунок 1.4 — Пінпойнтер Deteknix XPointer PI

White's Bullseye TRX також реалізує принцип імпульсної індукції, працюючи з частотою імпульсів близько 100–200 кГц і забезпечуючи глибину виявлення до 0.012–0.015 м. Модель вирізняється високою точністю локалізації, низьким рівнем хибних спрацювань і стабільною роботою в умовах, де інші типи технологій відчутно втрачають ефективність. Надійність, швидка реакція на ціль та добрі ергономічні характеристики зробили Bullseye TRX одним із найуспішніших імпульсних приладів на ринку.



Рисунок 1.5 — Пінпойнтер White's Bullseye TRX

1.4 Класифікація магнітометричних датчиків

Магнітометричні датчики становлять важливий клас вимірювальних перетворювачів, призначених для реєстрації статичних і динамічних магнітних полів. У сучасній класифікації їх поділяють за фізичним принципом роботи, чутливістю, діапазоном вимірювань, рівнем шуму та енергоспоживанням. До основних груп належать феррозондові прилади, індукційні котушкові сенсори, напівпровідникові датчики Холла, магніторезистивні структури AMR та інтегровані MEMS-рішення.

Феррозондові магніметри відрізняються надзвичайно високою точністю і можуть мати нанотеслову чутливість, але володіють великими габаритами, складною конструкцією та високим енергоспоживанням, що робить їх не дуже придатними для портативних систем. Датчики Холла, навпаки, невеликі та економічні, але їхня чутливість і стабільність є

недостатніми для виявлення слабких магнітних аномалій, що характерні для малих металічних об'єктів.

Магніторезистивні сенсори, зокрема AMR-структури, забезпечують оптимальний баланс між чутливістю, шумовими характеристиками та компактністю. Вони показують суттєво вищу чутливість порівняно з датчиками Холла, мають невеликий власний шум і достатню стабільність у режимі низького поля, залишаючись доступними за ціною та легкими у впровадженні. AMR-технологія має проміжне місце між бюджетними, але малочутливими напівпровідниковими варіантами та високоточними, але дорогими сенсорами GMR/TMR.

Сучасні AMR/MEMS-устройства, як-от QMC5883L, інтегрують магніторезистивний елемент з електронікою цифрового інтерфейсу. QMC5883L пропонує тривимірні вимірювання в діапазоні від $\pm 0,88$ до $\pm 8,1$ гаусів, демонструє високу роздільну здатність, низьке споживання енергії та компактні габарити. Завдяки низькому рівню шуму AMR-сенсор може виявляти незначні локальні зміни магнітного поля, що виникають поблизу феромагнітних об'єктів, що недоступно для датчиків Холла.

Вибір сенсора QMC5883L для AMR/MEMS у цій роботі пояснюється потребою в поєднанні високої чутливості, компактності, низького енергоспоживання та доступності. У порівнянні з іншими технологіями, AMR технологія пропонує найкраще співвідношення «точність—вартість» для створення компактного й ефективного магнітометричного металошукача.

2. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В МЕТАЛОДЕТЕКТОРІ

Робота тестового металодетектора, реалізованого на основі магнітометра QMC5883L, ґрунтується на порівнянні природного магнітного поля та зареєстрованих його локальних аномальних змін, що виникають при появі феромагнітних об'єктів у зоні дослідження.(рис. 2.2). На відміну від індукційних металодетекторів, які створюють власне електромагнітне поле та аналізують відповідь об'єкта у вигляді вихрових струмів, магнітометричний метод є пасивним і базується на спостереженні викривлень існуючого магнітного фону. Феромагнітний матеріал, занурений у геомагнітне поле, змінює конфігурацію силових ліній та формує дипольну аномалію, величина якої визначається магнітною проникністю матеріалу, його геометричними параметрами та відстанню до датчика.

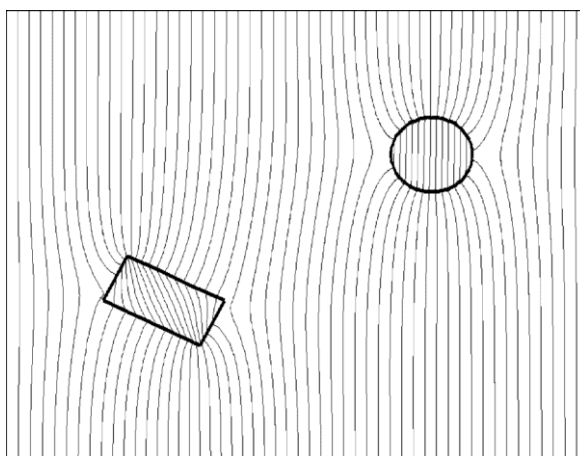


Рисунок 2.1 — Деформація силових ліній магнітного поля в присутності феромагнітних об'єктів різної форми

Вимірювання магнітної індукції здійснюється в Теслах (Тл), що є базовою одиницею системи СІ для опису електромагнітних процесів і використовується в міжнародних магнітних моделях. Через те що виміри відбуваються у ближній зоні детекції використовуємо похідну цієї одиниці, а саме мкТл (мікроТесла), оскільки саме в цьому діапазоні знаходиться поля та більшість змін, що реєструються датчиком при появі

феромагнітного об'єкта. Також це підтверджується узгодженням результатів вимірювання з технічними характеристиками датчика магнітного поля, а також з моделюванням об'єктів

2.1 Магнітне поле Землі як робочий сигнал

Магнітне поле Землі в районі м. Києва має модуль індукції на рівні приблизно 48–50 мкТл, що відповідає середнім широтам Північної півкулі та узгоджується з міжнародними моделями. Походження геомагнітного поля зумовлене механізмом геодинамо в рідкому зовнішньому ядрі Землі, де внаслідок теплової та хімічної конвекції у провідному розплаві формуються електричні струми, які, під дією сили Коріоліса, створюють довготривале магнітне поле переважно дипольної конфігурації. На розподіл індукції впливають широтні особливості: поблизу екватора значення становить 25–30 мкТл, у середніх широтах зростає до 45–55 мкТл, а в приполярних регіонах перевищує 70 мкТл (рис. 2.2).

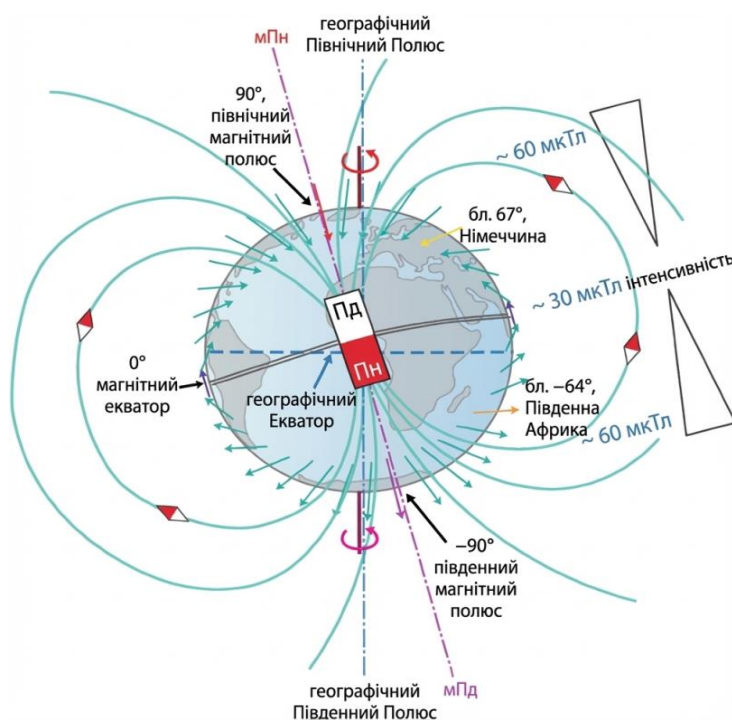


Рисунок 2.2 — Структура геомагнітного поля Землі та орієнтація вектора магнітної індукції

Додаткові відхилення формуються локальною геологічною структурою та можуть становити від одиниць до десятків мікротесл, хоча територія Київського регіону не належить до зон значних магнітних аномалій. Тимчасові варіації геомагнітного поля спричиняються іоносферними та магнітосферними процесами: добові зміни зазвичай не перевищують 20–50 нТл, а під час магнітних бурь можуть досягати 1–10 мкТл. Висотна залежність описується наближеною дипольною моделлю та становить 0,05–0,08 мкТл на 100 м, що є незначним для наземних вимірювань. Техногенні джерела, такі як сталеві конструкції, підземні комунікації та електромережі, створюють локальні відхилення у межах ± 2 –10 мкТл і формують фон, відносно якого реєструються ще дрібніші локальні зміни, спричинені металічними об'єктами.

Стабільність геомагнітного поля в масштабі хвилин і годин робить його придатним для використання як природного опорного сигналу в магнітометричних системах. Це дозволяє реалізувати пасивний принцип виявлення без необхідності генерувати власне електромагнітне випромінювання, що є важливою перевагою для портативних та енергоефективних детекторів.

2.2 Взаємодія феромагнітного об'єкта з магнітним полем

Феромагнітні матеріали, насамперед різні групи сталей мають підвищену відносну магнітну проникність через свою здатність концентрувати силові лінії зовнішніх магнітних полей, через що формують локальні магнітні аномалії. У геомагнітному полі Землі сталевий об'єкт заміняє собою вторинний індукований диполь, спричиняючи відхилення індукції як у бік збільшення, так і зменшення залежно від конфігурації поля та орієнтації об'єкта. Амплітуда такої аномалії спадає відповідно до дипольного закону, що обмежує практичну дальність її реєстрації датчиком магнітного поля.

Магнітні властивості сталей суттєво визначаються їхньою мікроструктурою, фазовим станом який можна поділити на три підтипи: феритний, мартенситний чи аустенітний, хімічним складом та історією термічної обробки.

Феритні сталі з ОЦК-граткою мають стабільну феромагнітну структуру, що забезпечує високу проникність і формування магнітних аномалій.

Мартенситні сталі утворюється внаслідок швидкого гартування та характеризується тетрагональною пересиченою граткою, також зберігає сильні феромагнітні аналогічно до феритних сталей.

Аустенітні сталі з ГЦК-граткою є парамагнітними при кімнатній температурі й демонструють мінімальну магнітну відповідь, через що формують найслабші аномалії.

Для порівняння характеристик різних груп сталей у контексті магнітометричного детектування нижче наведено узагальнену таблицю 2.2 їхньої відносної магнітної проникності.

Таблиця 2.2 — Орієнтовні значення відносної магнітної проникності різних типів сталей

Тип сталі	Мікроструктура/ Фазовий стан	Приклади марок	Орієнтовна відносна магнітна проникність
Вуглецеві сталі	Феритна/перлітна	AISI 1010, AISI 1045	100–300
Леговані сталі	Феритна/ мартенситна	AISI 4140, AISI 4340	100–600
Нержавіючі сталі (аустенітні)	Аустенітна	AISI 304, AISI 316	1.003–1.05
Нержавіючі сталі (феритні)	Феритна	AISI 430	600–1800
Нержавіючі сталі (мартенситні)	Мартенситна	AISI 410	40–1000

Дуплексні сталі	Феритно-аустенітна	AISI 2205	100–500
Чисте технічне залізо (довідково)	Феритна	Armco Iron	до 200 000

2.3 Реакція магнітометра на магнітну аномалію

QMC5883L - це тривісний магнітометр, що містить три окремі сенсорні елементи анізотропного магніторезистивного типу. Принцип роботи зазначених елементів базується на змінах електричного опору тонкої магніточутливої плівки в результаті зміни орієнтації зовнішнього магнітного поля щодо напрямку струму, що проходить через резистивні елементи. Чутлива плівка створена з використанням сплавів з високої магнітної проникності, що забезпечує велику амплітуду магніторезистивного ефекту та належну стабільність характеристик в широкому температурному діапазоні.

При появі феромагнітного об'єкта в зоні вимірювання спостерігається викривлення локальної структури вектора магнітної індукції. Ця трансформація виявляється в зміні модуля вектора індукції, його просторовому напрямку, а також у часових характеристиках сигналу при переміщенні об'єкта. Коли магнітне поле деформується до сенсорних елементів, їх опір змінюється в залежності від амплітудних і кутових параметрів зовнішнього поля. Зміна опору викликає диференціальну напругу на виході вимірювального мосту, що є первинною фізичною реакцією системи на магнітну аномалію.

Сигнал, що формується сенсором, потрапляє на етап електронного кондиціонування, де проходить підсилення, нормалізацію та компенсацію температури. Щоб усунути залишкові зсуви, внутрішній мікросхемний блок здійснює автоматичне коригування нуля, що покращує відтворюваність вимірювань, навіть при тривалому впливі постійних

полів. Значення напруги, яке пропорційне миттєвому значенню магнітної індукції, подається на сигма-дельта перетворювач з підвищеною розрядністю. Цифровий результат оцифрування відзначається високою надійністю, що забезпечується шляхом надмірної вибірки і внутрішньої фільтрації.

По завершенню перетворення дані з трьох ортогональних осьових каналів отримують цифрову форму. Магнітометр передає ці дані мікроконтролеру у вигляді трьох числових компонент, які відповідають проєкціям вектора магнітної індукції на осі X, Y та Z. Виходячи з цих проєкцій, обчислюється величина результуючого вектора індукції за кореневою формулою, що визначає загальну характеристику магнітного поля у точці вимірювання. Наступні порівняння теперішнього значення з попереднім дозволяють виявити зміну вектора індукції, що є важливим показником виникнення металевих об'єктів у зоні контролю.

У такій структурі весь процес перетворення є багатоступеневим та включає фізичну взаємодію зовнішнього магнітного поля з магніторезистивними елементами, електронне підсилення та стабілізацію сигналу, високоточне аналого-цифрове перетворення, цифрову нормалізацію і формування даних для подальшої обробки на мікроконтролері. Комплекс цих процесів забезпечує можливість високо-чутливого реєстрування малих відхилень магнітного поля, що є критичним чинником у задачах визначення наявності феромагнітних включень та металевих об'єктів у просторі.

2.4 Чому магнітометр реагує лише на феромагнітні матеріали

Різниця між двома типами металодетекції полягає в тому, що навідміну від індукційних металодетекторів, які реагують на широкий спектр провідних матеріалів, магнітометричні системи практично не реєструють наявність кольорових (неферомагнітних) металів.

Це пояснюється їхніми фізичними властивостями: мідь, алюміній, латунь та інші немагнітні матеріали мають магнітну проникність, близьку до одиниці, тобто майже не взаємодіють з магнітним полем Землі. Внаслідок цього вони не створюють помітних викривлень статичного магнітного поля, на підставі яких працює магнітометричний сенсор.

Феромагнітні матеріали, в свою чергу, навпаки мають значно вищу магнітну проникність та здатністю концентрувати силові лінії, що призводить до формування дипольних аномалій. Це спричиняє відхилення індукції як у бік збільшення, так і зменшення. Магнітометр реєструє відхилення, що дозволяє визначити наявність, орієнтацію та потенційно приблизний розмір або тип матеріалу сталевих об'єктів.

Таким чином, магнітометричний метод є спеціалізованим: він забезпечує чутливість саме до феромагнітних матеріалів і практично не реагує на кольорові метали. Це визначає його нішу детектування, а саме він ефективний для виявлення сталевих конструкцій, арматури та інших об'єктів із високою магнітною проникністю, але не підходить для пошуку кольорових металів, які взаємодіють переважно з динамічними, а не статичними полями.

3. РОЗРОБКА

Для реалізації експериментального металошукача було розроблено електронну схему, основу якої складає тривісний магнітометр QMC5883L (рис. 3.1). Цей датчик забезпечує вимірювання просторових компонент магнітного поля та дозволяє фіксувати локальні зміни індукції, що виникають у присутності феромагнітних об'єктів. Вибір саме магнітного сенсора, а не традиційної індукційної котушки, був зумовлений необхідністю дослідження можливості виявлення металів на основі аналізу викривлення магнітного поля, а не класичної взаємодії з електромагнітною індукцією. Такий підхід дає змогу оцінювати не тільки наявність металу, але й характер його впливу на локальний магнітний фон.

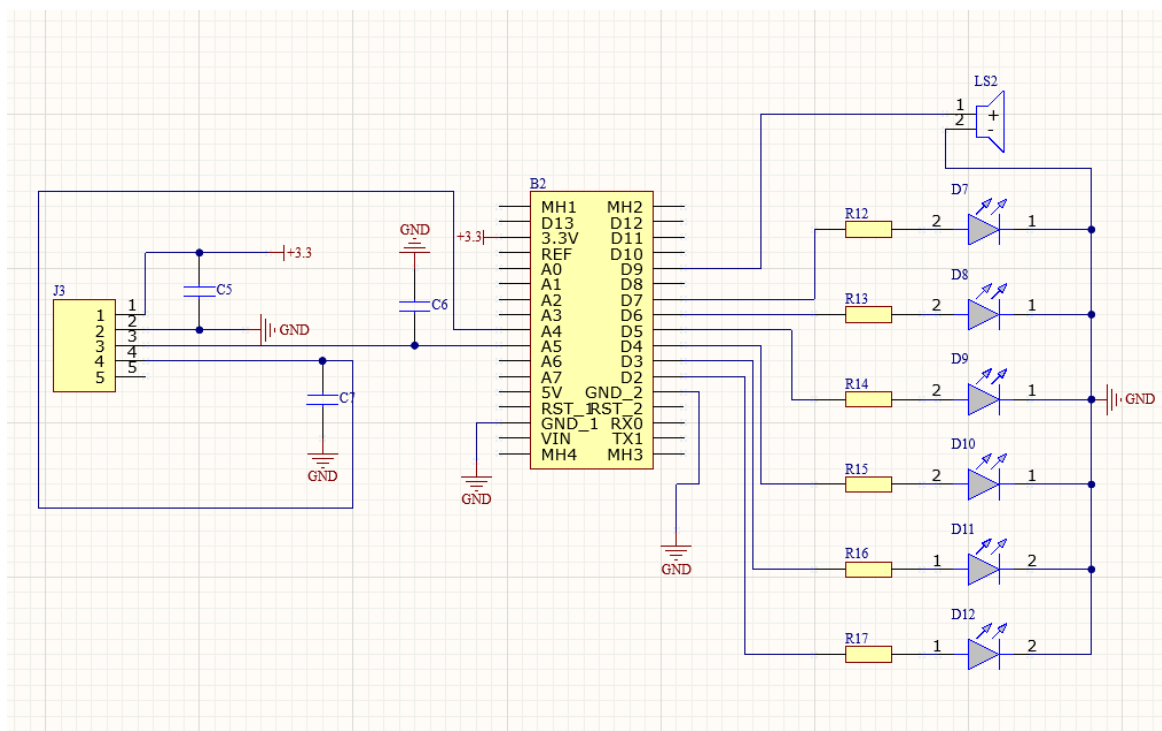


Рисунок 3.1 — Принципова схема пристрою металодетектора

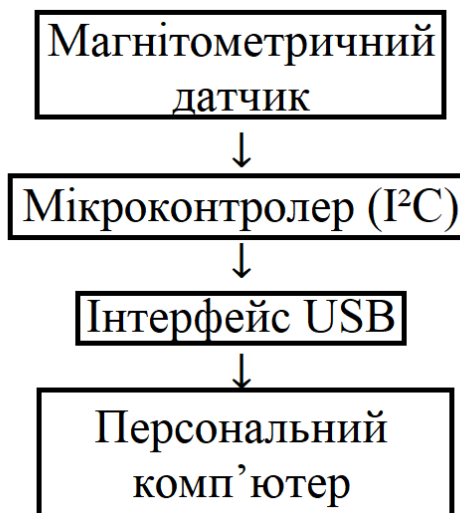


Рисунок 3.2 — Функціональна структура

На рис. 3.1 представлено принципову схему пристрою металодетектора. Датчик QMC5883L підключений до мікроконтролера Arduino Nano через інтерфейс I²C, що дає змогу організувати простий, надійний і стандартизований обмін даними на частотах до 400 кГц. Саме Arduino було обрано як обчислювальну платформу, тому що вона забезпечує зручність отримання, обробки та реєстрації даних у процесі дослідницької роботи. Вбудована підтримка бібліотек для роботи з датчиками, простота підключення та відкритість екосистеми дають змогу швидко реалізовувати експериментальні алгоритми, змінювати їх, порівнювати результати та фіксувати поведінку магнітного поля у різних умовах. Таким чином, Arduino виступає не лише контролером для індикації, але й повноцінним інструментом для подальших наукових досліджень та аналізу сигналів.

Стабільність роботи магнітометра значною мірою визначається якістю живлення. Тому в схемі передбачено комплекс заходів з фільтрації. Конденсатор C5 (0,22 мкФ) використано для згладжування низькочастотних коливань на лінії живлення +3.3 V. Конденсатори C6 та C7 (по 1500 пФ) виконують функцію високочастотних шунтуючих

елементів, підключених безпосередньо до сигнальних ліній I²C. Вони зменшують перешкоди електромагнітного та радіочастотного характеру й стабілізують форму сигналів, що особливо важливо під час роботи в умовах підвищеного шумового фону (електродвигуни, блоки живлення, радіочастотні передавачі тощо). Така структура фільтрації відповідає практичним рекомендаціям виробника та дозволяє мінімізувати похибку від завад, що суттєво впливає на точність вимірювань.

Магнітометр QMC5883L під'єднується до контактів A4 та A5 мікроконтролера Arduino Nano, оскільки ці лінії апаратно з'єднані з внутрішнім контролером інтерфейсу I²C. Вивід A4 (SDA) виконує роль двонаправленої лінії передачі даних, через яку мікроконтролер отримує інформацію з датчика та надсилає команди для управління його регістрами. Вихід A5 (SCL) надсилає тактовий сигнал, який забезпечує синхронізацію передачі. Обидві лінії функціонують в режимі відкритого колектора та застосовують підтягувальні резистори, які інтегровані в модулі датчиків, що забезпечує правильні логічні рівні та зменшує похибки передачі. Застосування зазначених виводів гарантує стабільну роботу магнітометра та оптимальну швидкість взаємодії з мікроконтролером.

Для забезпечення світлової та звукової індикації в пристрої застосовуються цифрові порти групи D. Ці виходи генерують стабільні логічні рівні 0/5 В, що дозволяє безпосередньо управляти світлодіодами через обмежувальні резистори та створювати керуючі імпульси для звукового пристрою. Швидкість цифрових портів достатня для виконання динамічної індикації, зокрема для регулювання яскравості світіння та створення звукових сигналів із різними частотами, що відповідають природі магнітних збурень. Виділення окремої групи цифрових виходів для функцій індикації також виключає вплив на роботу чутливого

інтерфейсу I²C, покращує стійкість системи до завад і робить програмне управління індикаторами більш зручним.

З правого краю принципової схеми знаходиться індикаторний модуль, що складається з шести світлодіодів D7–D12, підключених через обмежувальні резистори R12–R17. Ці елементи створюють візуальний стовпчиковий графік коливань магнітного поля, що дозволяє швидко оцінити інтенсивність зафіксованих аномалій без потреби у цифрових даних. Для звукової індикації також застосовується елемент LS2. Сигнал, який генерується ним, змінює ритм або частоту відповідно до сили магнітного збурення, що робить сприйняття більш інтуїтивним і сприяє швидкій реакції під час експериментів.

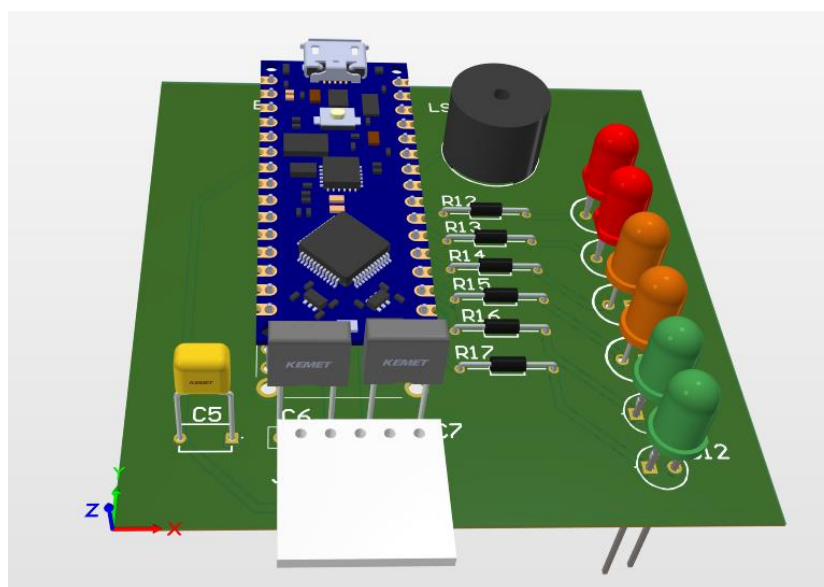


Рисунок 3.2 — Тривимірну модель друкованої плати

На рисунку 3.2 наведено тривимірну модель друкованої плати, створену в середовищі Altium Designer. 3D-візуалізація дозволяє оцінити взаємне розміщення елементів, їхню сумісність, ергономічність та зручність доступу до роз'ємів для подальших досліджень. Особливу увагу було приділено мінімізації довжини ліній I²C, правильному розміщенню шунтуючих конденсаторів поблизу контактів датчика та формуванню окремих контурів землі для зниження чутливості до паразитних завад.

Програмне забезпечення, яке забезпечує зчитування даних з датчика QMC5883L, їх попередню фільтрацію, калібрування, а також керування світловою та звуковою індикацією, наведено у Додатку А. Саме програмна частина дає змогу детально аналізувати динаміку змін магнітного поля та порівнювати результати з теоретичними розрахунками й моделями.

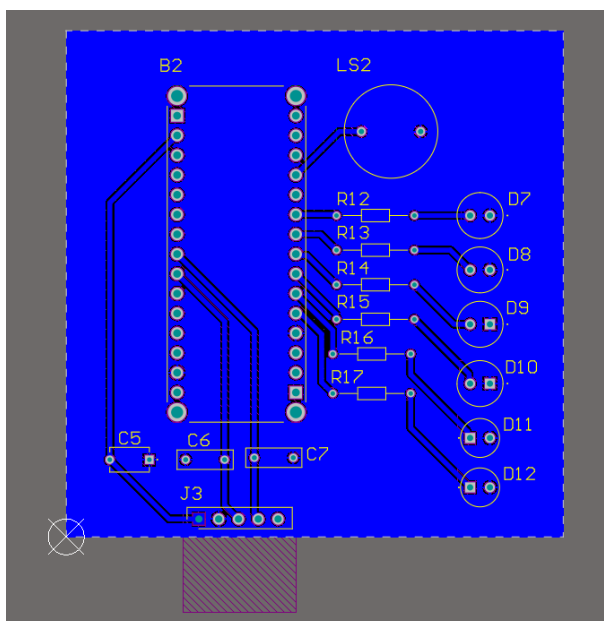


Рисунок 3.3 — Розводка сигнальних та живильних доріжок на РСВ

У створеному пристрої застосовано цифровий магнітометр QMC5883L (рис. 3.4), що гарантує тривимірне вимірювання магнітного поля з високою стабільністю та малим енергоспоживанням. Датчик об'єднує сенсорну матрицю, що складається з плівкових магніторезистивних елементів, і інтегровані схеми обробки сигналів, що забезпечують отримання готових цифрових даних без необхідності в додаткових аналогових підсилювачах.

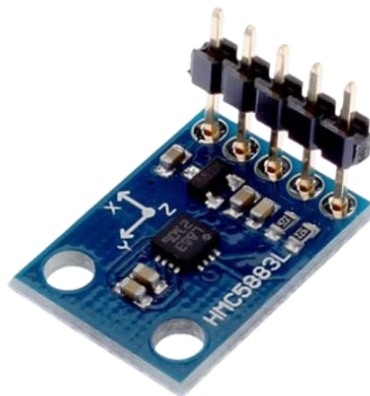


Рисунок 3.4 — Датчик QMC5883L

QMC5883L функціонує в діапазоні $\pm 2 \dots \pm 8$ Гаус, що є достатнім для фіксації незначних коливань навколишнього магнітного поля. Роздільна здатність 0.1–0.5 мкТл здатна виявляти незначні локальні зміни, а вбудований перетворювач генерує цифрові дані з низькими електричними шумами. Завдяки споживанню не більше 200 мкА, датчик підходить для автономних систем з тривалим періодом експлуатації. На відміну від індукційних датчиків, QMC5883L виявляє не змінні струми, а структуру статичного магнітного поля, тому є особливо чутливим до предметів з істотною магнітною проникністю. Будь-яке феромагнітне тіло, розміщене поряд, викликає локальне спотворення фонового поля, яке датчик фіксує як зміну конкретної компоненти вектора індукції. З метою забезпечення правильної роботи необхідно виконати цифрову компенсацію систематичних зсувів і calibrate, оскільки магнітометр чутливий до магнітних впливів із боку корпусу, кріплень або елементів плати. Частота оновлення даних від 10 до 200 Гц дає можливість налаштувати функціонування під різні режими: від чутливого повільного сканування до швидкої перевірки предметів. Комплекс характеристик — невеликий рівень шуму, компактні габарити, цифровий вихід і великий робочий діапазон — роблять QMC5883L підходящим для використання в

портативних пошукових пристроях, де потрібно точно виявляти незначні зміни магнітного поля за доступною ціною електроніки.

Для управління магнітометричним модулем використано плату Arduino Nano, що ґрунтується на мікроконтролері ATmega328P. Вибір цієї платформи зумовлений її надійністю, наявністю апаратного інтерфейсу I²C, прийнятною продуктивністю при частоті 16 МГц, а також невеликими вимогами до зовнішнього підключення. Мікроконтролер гарантує швидке зчитування інформації з магнітометра, цифрову фільтрацію та створення індикаторних сигналів у режимі реального часу.

Arduino Nano легко програмується та швидко інтегрується у вимірювальний цикл: передача даних через USB дозволяє безпосередньо створювати графіки, аналізувати результати та виконувати обробку даних на ПК без додаткових пристроїв. Живлення від 5 В полегшує створення автономних систем, а споживання в межах 20–25 мА не викликає суттєвих електромагнітних завад для магнітометра.

Функціональна логіка взаємодії з QMC5883L реалізована через стандартний I²C-протокол, тому за потреби Arduino Nano можна швидко замінити іншим мікроконтролером з незначними змінами в прошивці. Це покращує гнучкість структури та полегшує подальше оновлення системи.

3.1 Проектування корпусу магнітометричного металодетектора

Для досягнення зручного розміщення електронних компонентів, їх механічного захисту та зменшення впливу конструктивних елементів на результати вимірювань було здійснено проектування корпусу пристрою. Конструкція корпусу була створена з урахуванням розмірів друкованої плати, специфіки розміщення магнітометричного датчика, а також вимог до зручності використання та доступу до внутрішніх компонентів під час налаштування.

Моделювання корпусу виконувалося в програмі SolidWorks, що дало змогу візуалізувати геометрію компонентів, оцінити їх взаємне розташування та перевірити відповідність всіх частин вже на етапі проектування. Зосередилися на виборі простого циліндричного корпусу, що забезпечує належну жорсткість конструкції, легкість виготовлення і зниження концентрації механічних напруг.

При проектуванні також була врахована потреба в застосуванні немагнітних матеріалів для зниження впливу корпусу на функціонування магнітометричного датчика. Це надзвичайно важливо для підтримки точності вимірювань магнітного поля та належного функціонування пристрою в цілому.

У подальшому на рисунках 4.1-4.3 наведено основні елементи корпусу, процес розміщення друкованої плати та загальний вигляд зібраної конструкції.

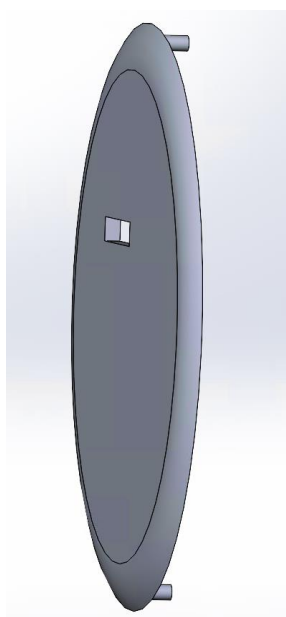


Рисунок 4.1 – Торцева кришка корпусу пристрою

На рисунку 4.1 показано торцеву кришку корпусу, яка використовується для закриття основної частини конструкції. Кришка забезпечує механічний захист внутрішніх компонентів та може бути знята

для доступу до друкованої плати під час налагодження або обслуговування пристрою.

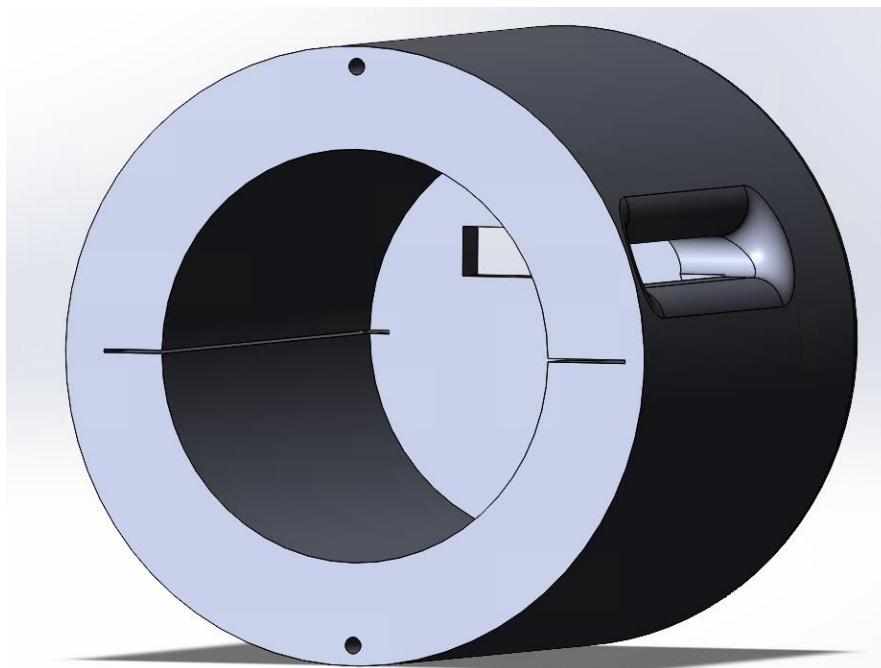


Рисунок 4.2 – Основна частина корпусу магнітометричного металодетектора

На рисунку 4.2 наведено тривимірну модель основної циліндричної частини корпусу. У боковій поверхні передбачено проріз, призначений для візуального доступу до елементів, розташованих на друкованій платі, а також для забезпечення вентиляції. Форма корпусу обрана з урахуванням компактності та зручності розміщення електронних компонентів.

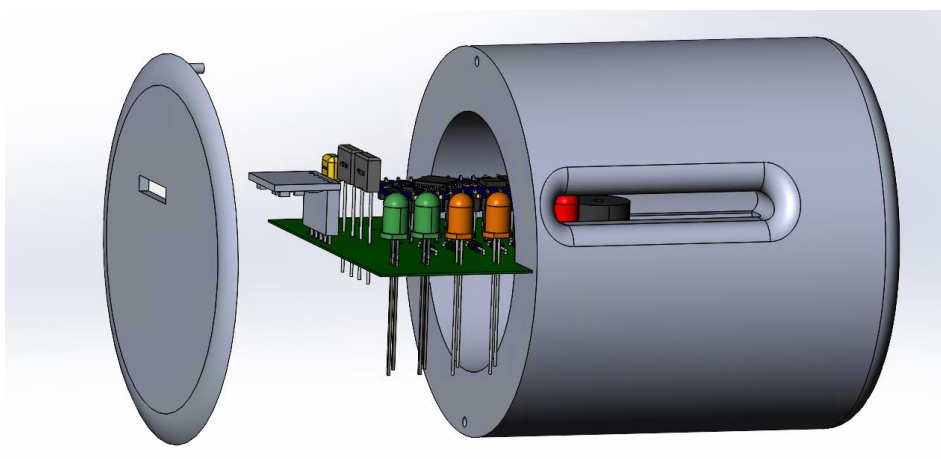


Рисунок 4.3 – Розміщення друкованої плати всередині корпусу

На рисунку 4.3 показано взаємне розташування друкованої плати з електронними компонентами відносно корпусу. Таке компонування забезпечує надійну фіксацію плати, мінімізацію довжини з'єднувальних провідників та зручність підключення інтерфейсів.

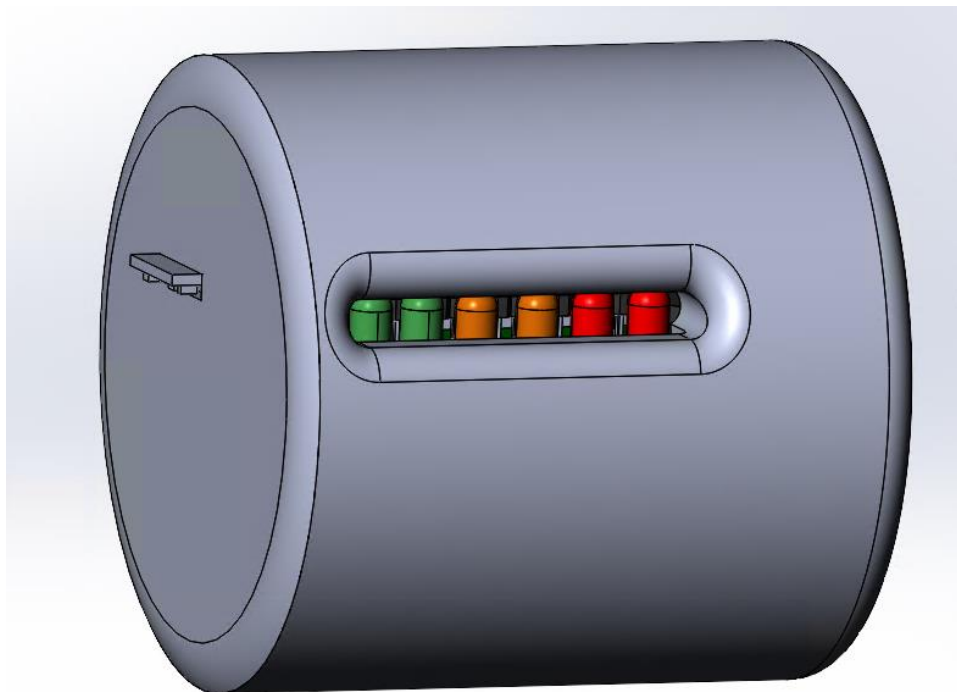


Рисунок 4.4 – Загальний вигляд зібраного корпусу пристрою

На рисунку 4.4 наведено зібраний корпус магнітометричного металодетектора з установленою друкованою платою. Запропонована конструкція забезпечує механічну цілісність пристрою, захист електронних компонентів від зовнішніх впливів та можливість подальшої модернізації.

4. ОГЛЯД МЕТАЛОДЕТЕКТОРА НА ОСНОВІ БИТТЯ ЧАСТОТ

Для порівняння з розробленим металодетектором на основі датчика магнітного поля було проаналізовано один із типових представників класичних індукційних пристроїв, що використовують метод частотної детекції. Такі пристрої належать до групи простих індукційних металошукачів, принцип дії яких ґрунтується на реєстрації змін частоти генератора, викликаних варіаціями індуктивності пошукової котушки у присутності металевих об'єктів. Метод реалізує схему типу Beat Frequency Oscillator рис. 4.1, що є одним із найстаріших та енергетично найменш затратних способів індукційного детектування.

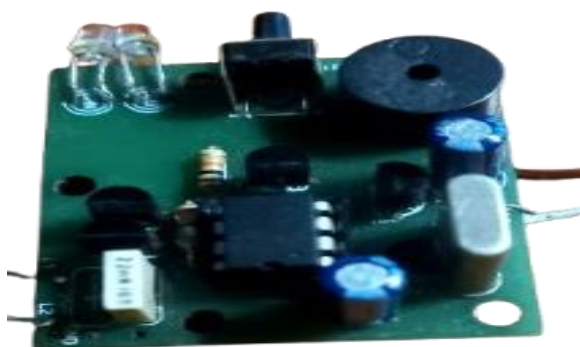


Рисунок 4.1 — Досліджувана схема ВФО-металодетектора

Конструктивно металодетектор складається з генераторного вузла, пошукової котушки індуктивністю приблизно 2,7 мГн, мікроконтролера, що відповідає за аналіз частотних коливань, та індикаторної частини. У схемі застосовується мікроконтролер сімейства PIC12F629/675, який забезпечує вимірювання нестабільності частоти генератора та реалізує алгоритми індикації. Окрема увага у конструкції приділена стабілізації живлення: пристрій використовує стабілізатор на основі мікросхеми LM317, що мінімізує дрейф частоти під час розряду батареї та забезпечує стабільні показники роботи протягом тривалого часу.



Рисунок 4.2 — Пошукова котушка

Пошукова котушка(рис. 4.2) виконана з приблизно 200 витків мідного дроту діаметром 0.1 мм на каркасі діаметром близько 20 мм. Для зменшення впливу зовнішніх електричних завад застосовано екранування алюмінієвою фольгою, під'єднаною до загальної шини. Усі ці заходи дозволяють забезпечити відносно стабільну частоту генератора у межах 20–25 кГц залежно від конкретного екземпляра котушки та точності намотування. Саме зміна цієї частоти під дією металевго об'єкта і становить основний вимірювальний параметр.

Індикаторна частина складається зі світлодіодів та звукової індикації. Мікроконтролер аналізує напрямок і швидкість зсуву частоти та на цій основі відображає тип металу. У конструкції передбачено просту дискримінацію: один світлодіод сигналізує про наявність феромагнітних предметів, інший — про предмети з кольорових металів. Крім того, реалізовано звукове повідомлення про низький рівень заряду батареї, а

також періодичний контроль справності приладу через короткі звукові сигнали.

Металодетектор належить до категорії побутових або навчальних пристроїв, однак демонструє достатню чутливість для виявлення невеликих предметів на глибині до 0.05–0.1 м. Його головною перевагою є простота конструкції та відсутність складних високочастотних вузлів, що робить його зручним прикладом для порівняння з альтернативними методами детектування.

Таким чином, даний металодетектор було обрано як репрезентативну модель класичного індукційного пристрою, що дозволяє провести коректне порівняння між традиційним методом частотного аналізу та підходом, реалізованим у цій роботі на основі вимірювання локальних змін магнітного поля магнітометром.

4.1 Метод частотного биття в індукційних металодетекторах

У типовій конструкції такого металодетектора присутні два генераторні вузли. Перший — еталонний, що формує стабільну частоту, яка практично не змінюється під час роботи. Другий — пошуковий — містить котушку індуктивності, чутливу до зовнішніх впливів. При наближенні металевого предмета до котушки змінюється її ефективна індуктивність, що призводить до зміни резонансної частоти відповідного LC-контур.

Характер зміни частоти пошукового генератора залежить від типу металу та його фізичних властивостей. Феромагнітні матеріали із підвищеною магнітною проникністю ($\mu_r \gg 1$) збільшують індуктивність котушки, що викликає зменшення резонансної частоти. Неферомагнітні метали, як-от мідь або алюміній, не впливають на магнітну проникність, проте створюють вихрові струми, які формують протидіючий магнітний потік, зменшуючи ефективну індуктивність. У цьому випадку частота

генератора зростає. Таким чином, VFO-системи реагують на різні типи металів протилежним зсувом частоти, що дозволяє здійснити елементарну дискримінацію.

Обидва сигнали генераторів змішуються, утворюючи так звану частоту биття — різницю між еталонною та змінною частотами. Оскільки робочі частоти знаходяться в діапазоні сотень кілогерц, їх безпосереднє прослуховування неможливе. Натомість різниця частот потрапляє у звуковий діапазон і може бути відтворена за допомогою звукової індикації. Зміна частоти биття сприймається користувачем як змінений тон або ритм звукового сигналу. Поява металевих об'єктів поблизу котушки призводить до відповідного зростання або зменшення частоти звукового сигналу, що дозволяє одразу оцінити характер збурення за акустичною індикацією.

4.2 Експериментальне дослідження частотної реакції металодетектора

З метою більш детального аналізу роботи індукційного металодетектора для подальшого порівняння його характеристик з магнітометричним методом було виконано серію експериментів із вимірюванням частотного зсуву генератора під дією металевих об'єктів різних геометричних форм. Дослідження проводилося на спеціально зібраному стенді, що забезпечував відтворювану геометрію положення зразків відносно пошукової котушки та контроль відстані між ними.

Методика вимірювання ґрунтувалася на фіксації зміни частоти гармонічного генератора у момент наближення металевих об'єктів до площини котушки. Частота визначалася за допомогою частотоміра та синхронно контролювалася осцилографом для підтвердження стабільності сигналу та виключення паразитних модуляцій. Для кожного типу об'єкта реєструвалися значення частотного зміщення на відстанях 0.01 м та 0.05 м по 5 разів.

Під час експерименту було досліджено три типи геометричних зразків: суцільний сталевий циліндр, порожниста труба та профільний металевий елемент. Для кожного зразка визначали вплив його орієнтації відносно площини котушки, оскільки напрямок та конфігурація вихрових струмів безпосередньо впливають на зміну індуктивності та, відповідно, на частотний зсув. Результати вимірювань наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 — Зміна частоти генератора Δf під дією металевих об'єктів

Положение	Δf на відстані 0.05 м	Δf на відстані 0.01 м
Циліндр — поздовжня вісь перпендикулярна до площини катушки	-6,86	-33,6
Циліндр — поздовжня вісь паралельна до площини катушки	-5,76	-48
Труба — поздовжня вісь перпендикулярна до площини катушки	-4,46	-49,4
Труба — поздовжня вісь паралельна до площини катушки	-10,3	-34,4
Профіль — поздовжня вісь перпендикулярна до площини катушки	-2,2	-23,4
Профіль — поздовжня вісь паралельна до площини катушки	-5	-21

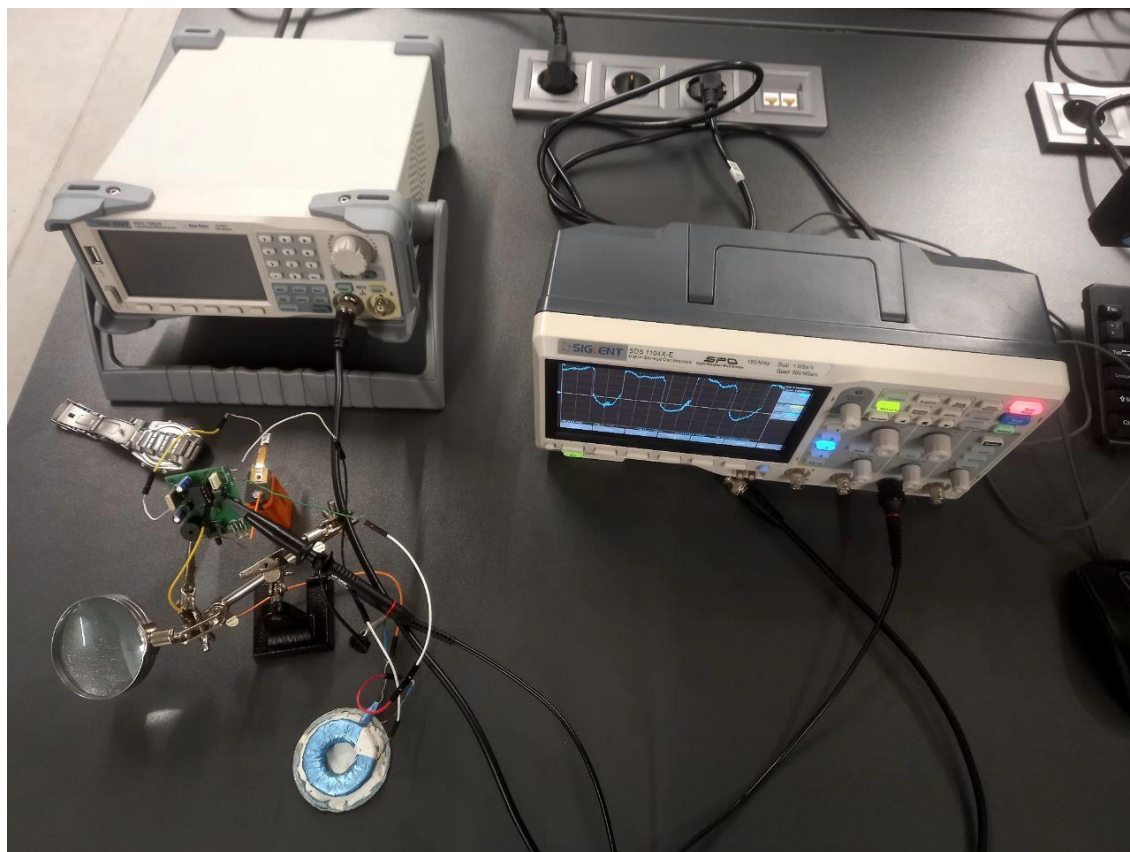


Рисунок 4.2 — Експериментальний стенд для вимірювання частотної реакції металодетектора

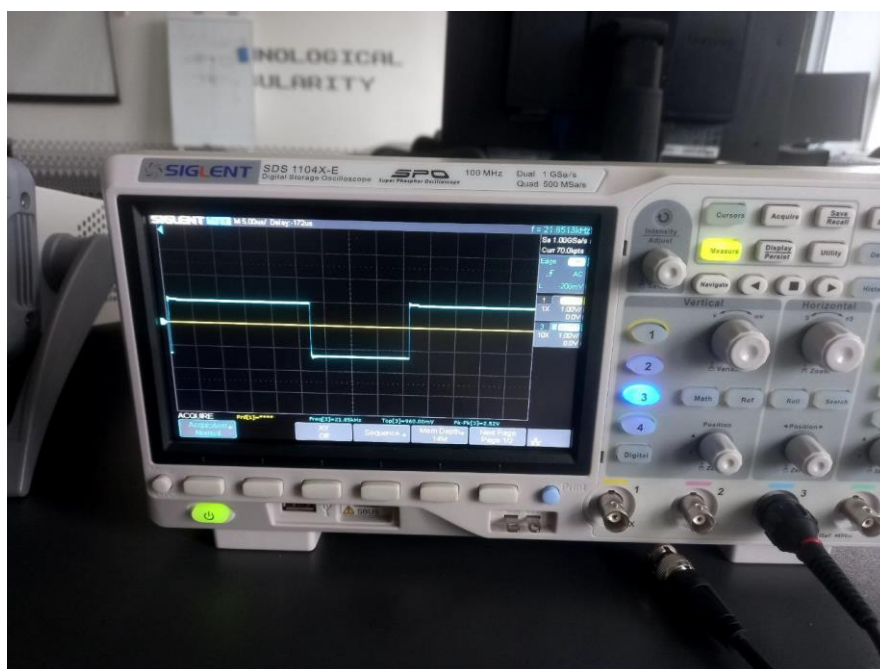


Рисунок 4.3 — Осцилограма сигналу генератора під час внесення металевого об'єкта

Проведені вимірювання дозволяють кількісно оцінити реакцію індукційного металодетектора на різні типи об'єктів та закладають підґрунтя для подальшого порівняння з магнітометричним методом. Частотний аналіз виявляє суттєву залежність від орієнтації та геометрії металевих тіл, тоді як магнітометрична система реагує на зміну просторового розподілу магнітного поля. Отримані дані формують базу для формування узагальнених критеріїв чутливості обох типів детекторів, що буде розглянуто у наступному розділі.

5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Метою експериментального дослідження було визначення характеру зміни магнітної індукції при наближенні ферромагнітних об'єктів різної форми до триосьового магнітометра QMC5883L, а також оцінка впливу геометрії, орієнтації, розмірів та типу об'єкта на величину зафіксованої магнітної аномалії.

Дослідження проводились у контрольованих умовах з метою мінімізації зовнішніх впливів. Використовувався триосьовий магнітометр QMC5883L, який фіксує компоненти магнітного поля вздовж трьох осей із роздільною здатністю до 0.1 мкТл. Вимірювання магнітної індукції проводилися відносно фонового поля Землі у місці проведення експерименту.

Об'єкти для дослідження були виготовлені з типових ферромагнітних матеріалів, а саме сталі або подібного сплава з високою магнітною проникністю. Використовувалися об'єкти наступних форм та розмірів рис. 5.1

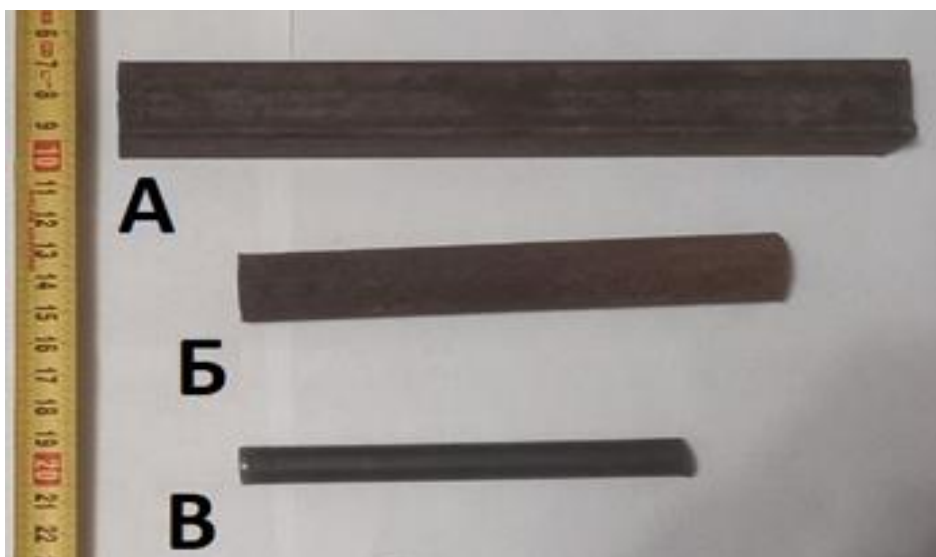


Рисунок 1.1 — Об'єкти що вимірювалися: А) профіль; Б) труба; В) циліндр

Геометричні розміри досліджуваних об'єктів становили: для циліндра діаметр 0,012 м і довжиною 0,13 м, для труби діаметр 0,021 м і довжиною 0,157 м та профіль із квадратним перерізом $0,025 \times 0,025$ м і довжиною 0,228 м. Кожен з об'єктів наближали до магнітометра у двох орієнтаціях: коли його поздовжня вісь була перпендикулярна до площини датчика та коли вона була паралельна цій площині. Вимірювання виконувалися на двох фіксованих дистанціях: 0.05 м, що відповідає умовній “дальній зоні”, де магнітне поле помітно ослаблене, але основний внесок формує дипольна складова, та 0.01 м, що визначає “ближню зону”, у якій поле має виражену нелінійність і значною мірою залежить від локальних ефектів намагніченості матеріалу. Для кожного об'єкта та орієнтації проводили 3–5 повторних вимірювань, що дозволило отримати усереднені значення сигналу.

5.1 Джерела шумів магнітометра

Перед початком оцінки отриманих результатів вимірювання необхідно проаналізувати похибки, зумовлені власними шумами магнітометра. Для твердотільних цифрових сенсорів типу QMC5883L характерні кілька базових типів шумів, кожен із яких має свою фізичну природу, специфічний спектральний розподіл та по-різному впливає на точність вимірювань магнітного поля. Нижче розглянемо основні джерела шумів та їхній внесок у формування загальної похибки.

5.1.1 Тепловий шум

Тепловий шум є фундаментальним видом випадкових флуктуацій, що виникає у резистивних елементах будь-якого електронного сенсора. В AMR-датчиках цей шум генерується тонкими плівками пермалою, які формують міст Вітстона. Через теплофізичну природу джонсонський шум існує завжди, навіть у повністю стабільних умовах, та визначає нижню межу чутливості на високих частотах

Для AMR-пристроїв QMC5883L, тепловий шум у перерахунку на магнітну величину становить: 0,05–0,1 мкТл RMS у смузі 10–20 Гц,

Цей шум не залежить від сигналу та практично не змінюється із часом, тому він є детермінантою короткочасної точності вимірювань.

5.1.2 Флікер-шум

Флікер-шум зумовлений доменною структурою матеріалу AMR-плівок і флуктуаціями магнітної анізотропії на мікроскопічному рівні. Він проявляється найсильніше у низькочастотному діапазоні (менше 1–5 Гц) і є основною перешкодою при спробах отримати стабільний середній сигнал за довгі інтервали часу.

Для сенсорів типу QMC5883L, на дані яких спираються виробники, виміряна амплітуда 1/f-шуму становить: 0.2–0.3 мкТл для частот близько 1 Гц.

У QMC5883L частина низькочастотних флуктуацій згладжується внутрішньою цифровою фільтрацією та oversampling, проте повністю їх усунути неможливо. Тому для цього датчика приймають: 0.15–0.25 мкТл на частотах нижче 1 Гц.

5.1.3 Температурний дрейф

Температурний дрейф пов'язаний із зміною магнітної проникності AMR-плівок, зміною опору, а також температурною нестабільністю АЦП та аналогових підсилювачів, інтегрованих у сенсор. На відміну від шумів, дрейф не є випадковим процесом — він створює поступову зміну нульової точки, що накопичується з кожним градусом зміни температури.

Для AMR-сенсорів Honeywell типові значення становлять: 0.5–1 мкТл/°C,

Дослідження QMC5883L у діапазоні 10–40 °C показують ідентичну картину, що свідчить про спільну технологічну базу.

5.1.4 Кількісний шум АЦП

Кількісний шум визначається розрядністю внутрішнього Σ - Δ АЦП, який у QMC5883L має ефективно від 12 до 16 біт залежно від обраного режиму вимірювання. Для максимального діапазону датчика $\pm 8,1$ Гс типовий крок квантування становить: $1\text{LSB} = 0.3\text{--}0.6$ мкТ

Квантовий шум оцінюється як: $0.1\text{--}0.2$ мкТл RMS.

5.1.5 Електромагнітні перешкоди від електроніки

На практиці реальна точність вимірювань визначається не лише внутрішніми шумами датчика, але й електромагнітними впливами з боку оточуючої електроніки:

тактові імпульси мікроконтролера;

пульсації імпульсних стабілізаторів живлення;

струмові петлі на платі;

перешкоди від USB, радіомодулів, дисплеїв, сервоприводів тощо.

Під час експериментів у конструкції портативного прототипу було встановлено, що навіть невелика зміна розташування кабелю або навантаження на лінію живлення може викликати додаткові флуктуації сигналу, величиною: $0.5\text{--}2$ мкТл, що є найбільшим внеском серед усіх джерел нестабільності.

5.2 Похибки вимірювання

Кожне з перелічених джерел шуму діє незалежно, тому сумарний ефективний шум у межах високочастотної смуги можна оцінити за коренем квадратним із суми квадратів. Для QMC5883L це дає навіть за мінімального рівня зовнішніх перешкод та стабільної температури сумарна шумова межа QMC5883L не опускається нижче 1 мкТл. У динамічних або неекраниваних умовах ця величина може сягати $1.5\text{--}3$ мкТл.

5.3 Представлення результатів

Зведені результати вимірювань магнітної аномалії (ΔB) за допомогою стенду на рисунку для всіх досліджуваних об'єктів, їхніх орієнтацій та фіксованих відстаней представлено у Таблиці 5.1 яка базується на графіках 5.2-5.7.

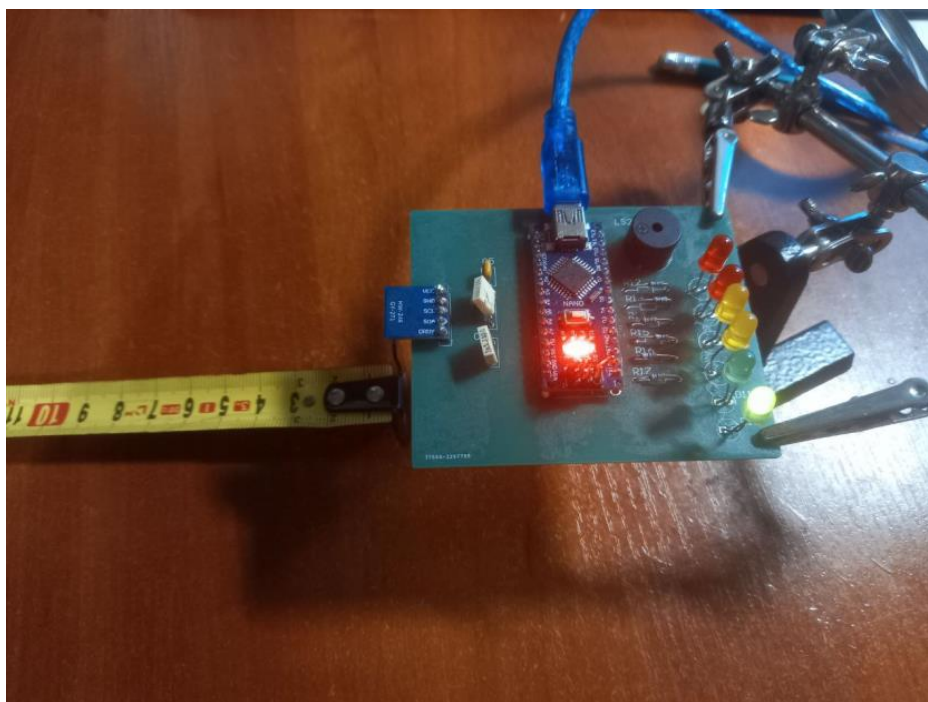


Рисунок 5.1 — Стенд для вимірювання

Таблиця 5.1 — Результати вимірювань магнітної індукції

Об'єкт	ΔB на відстані 0.05 м	ΔB на відстані 0.01 м
Циліндр — поздовжня вісь перпендикулярна до площини датчика	11	47,27
Циліндр — поздовжня вісь паралельна до площини датчика	-14	-30
Труба — поздовжня вісь	17,79	56,51

перпендикулярна до площини датчика		
Труба — поздовжня вісь паралельна до площини датчика	-12	-36
Профіль — поздовжня вісь перпендикулярна до площини датчика	26,19	27,63
Профіль — поздовжня вісь паралельна до площини датчика	-25	-30

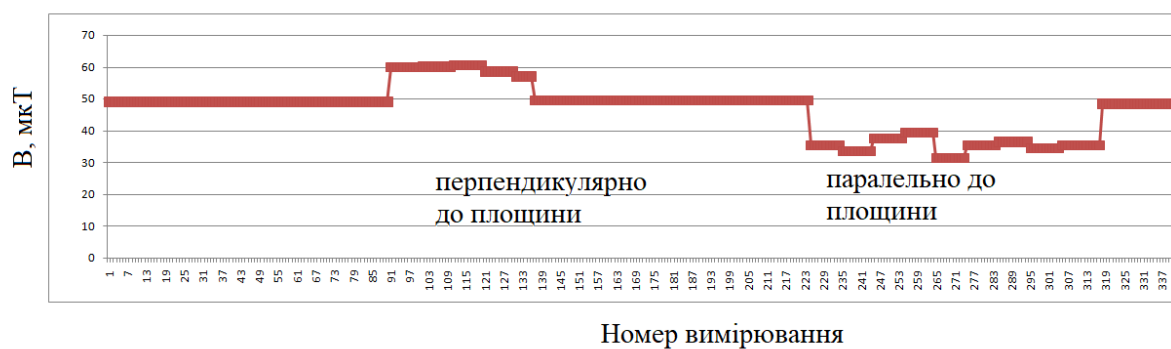


Рисунок 5.2 — Результат вимірювання для циліндра на відстані 0.05 м від датчика

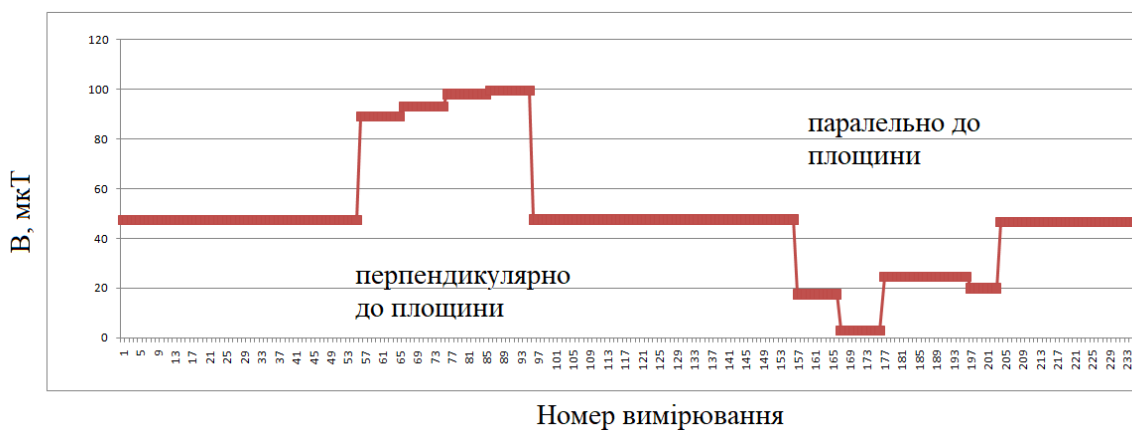


Рисунок 5.3 — Результат вимірювання для циліндра на відстані 0.01 м від датчика

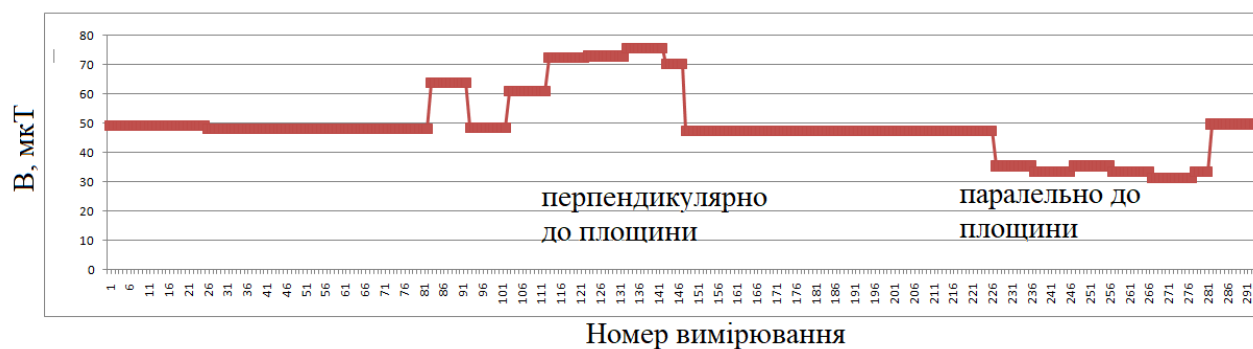


Рисунок 5.4 — Результат вимірювання для труби на відстані 0.05 м від датчика

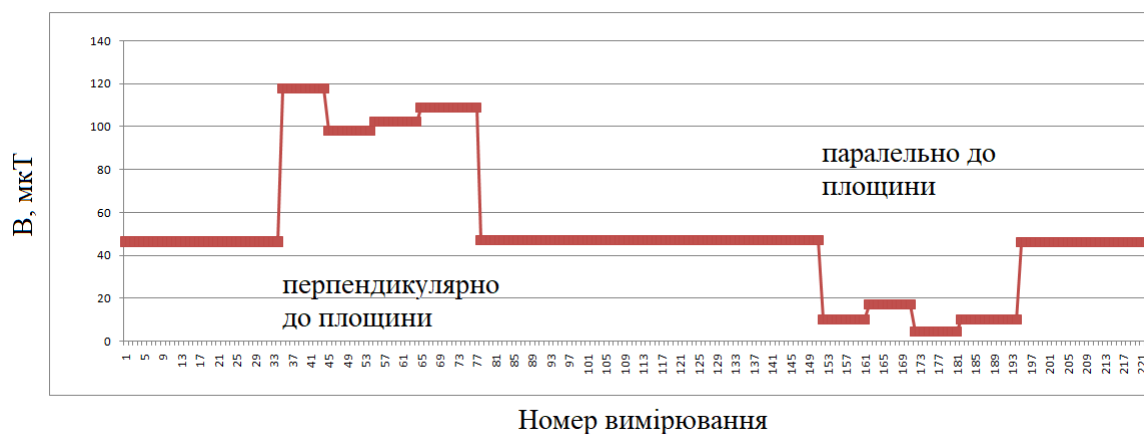


Рисунок 5.5 — Результат вимірювання для труби на відстані 0.01 м від датчика

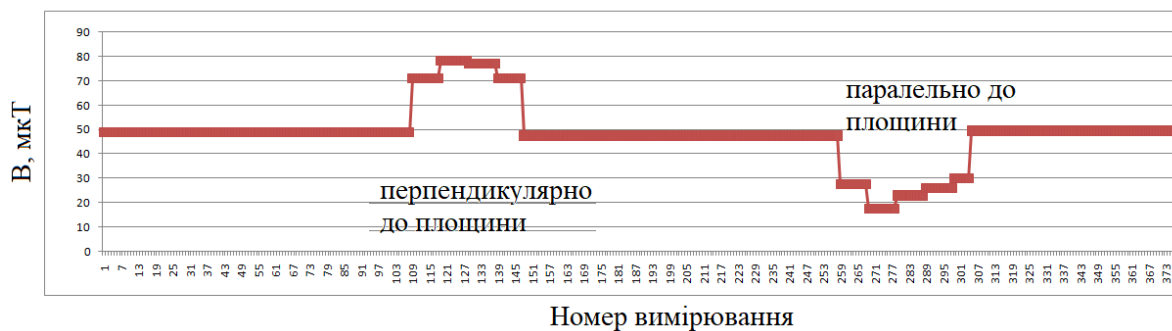


Рисунок 5.6 — Результат вимірювання для профіля на відстані 0.05 м від датчика

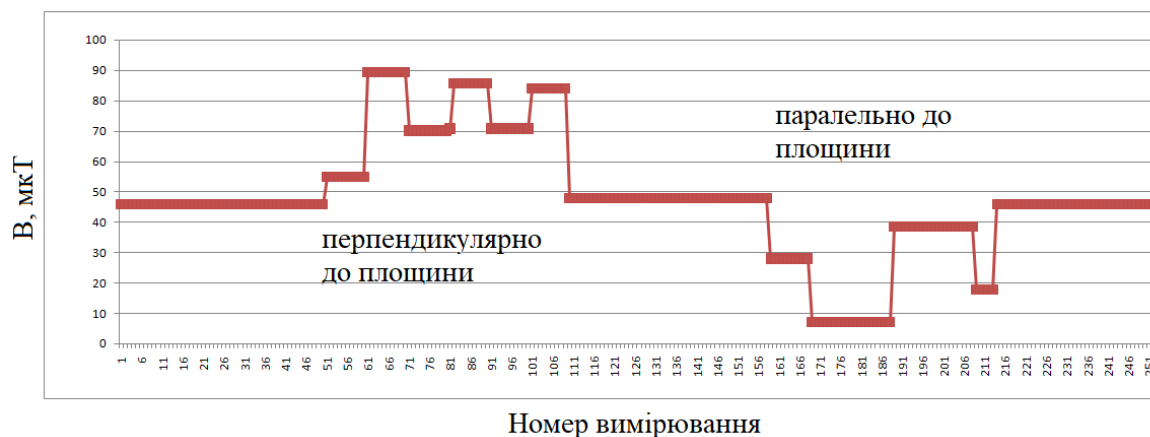


Рисунок 5.7 — Результат вимірювання для профіля на відстані 0.01 м від датчика

5.3.1 Залежність від відстані

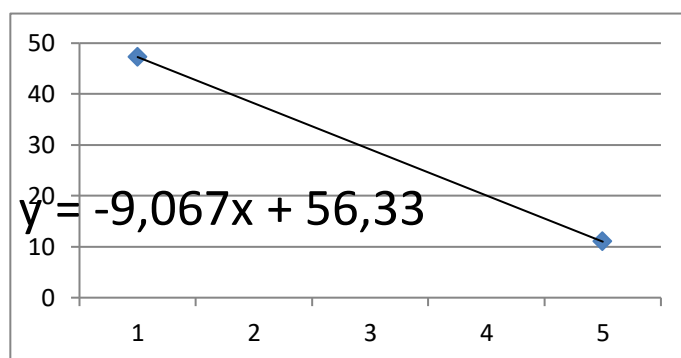


Рисунок 5.8— Апроксимація магнітної аномалії від відстані до об'єкта для циліндра перпендикулярного до датчика

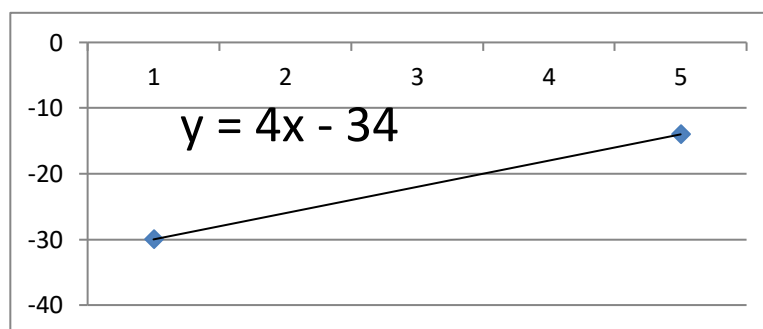


Рисунок 5.9— Апроксимація магнітної аномалії від відстані до об'єкта для циліндра паралейного до датчика

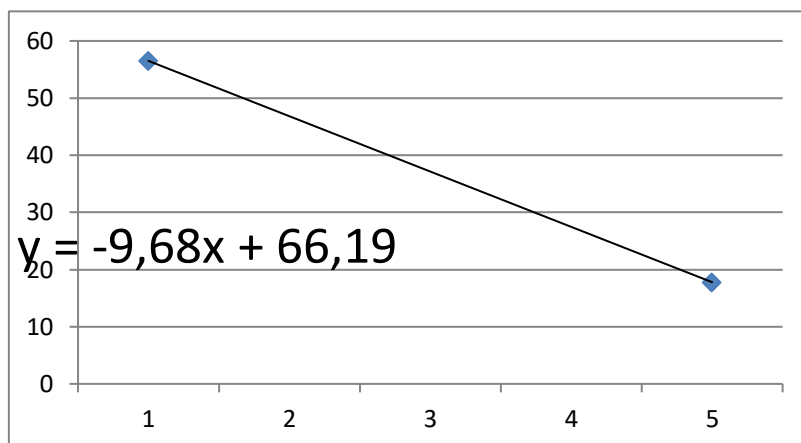


Рисунок 5.10— Апроксимація магнітної аномалії від відстані до об'єкта для труби перпендикулярної до датчика

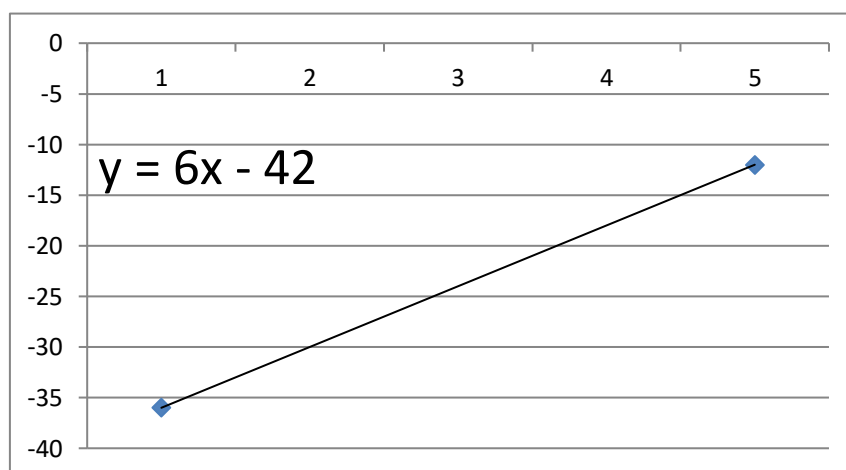


Рисунок 5.11— Апроксимація магнітної аномалії від відстані до об'єкта для труби паралейного до датчика

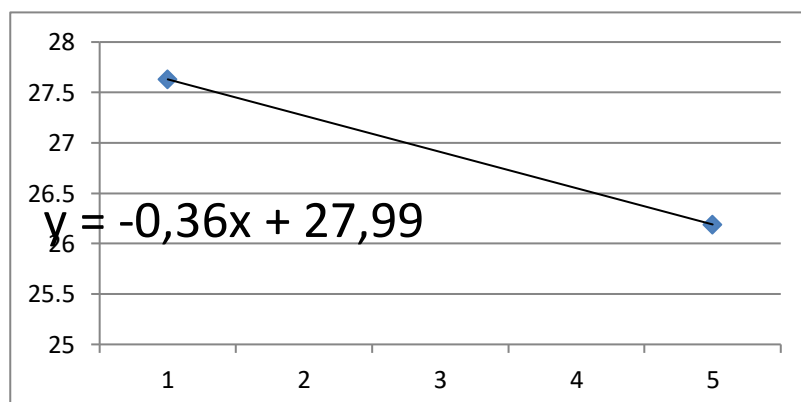


Рисунок 5.12— Апроксимація магнітної аномалії від відстані до об'єкта для профіля паралейного до датчика

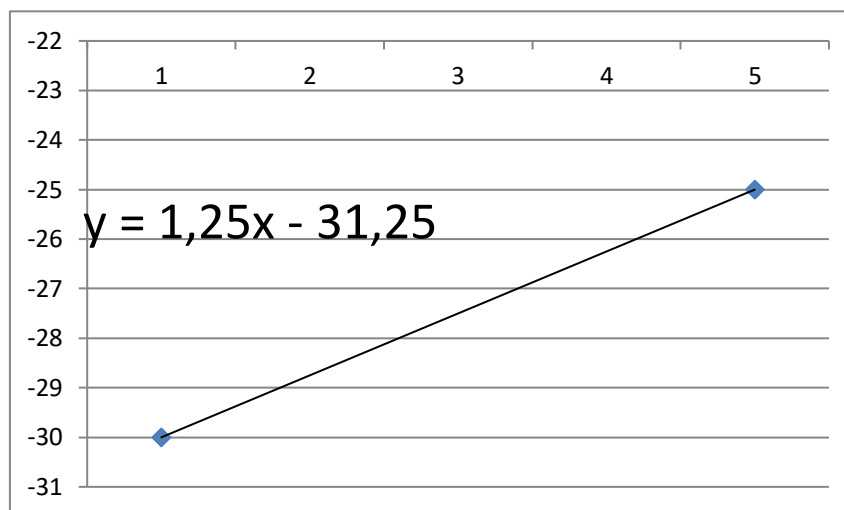


Рисунок 5.13— Апроксимація магнітної аномалії від відстані до об'єкта для профіля перпендикулярного до датчика

За результатами проведених експериментальних вимірювань встановлено, що у дослідженій конфігурації магнітна аномалія в інтервалі 0.01-0.05 м змінюється практично лінійно, що суттєво відрізняє ці результати від попередніх серій, де залежність мала степеневий характер. Усі шість побудованих апроксимацій демонструють, що магнітне поле в обраній ближній зоні поводить себе як система з майже сталим градієнтом, а найточніші математичні описи отримано у вигляді рівнянь лінійного типу.

Для першої серії вимірювань визначено, що при переході від відстані 0.05 м до 0.01 м амплітуда сигналу зростає більш ніж удвічі. Різниця між максимальним та мінімальним значеннями магнітної індукції в цьому інтервалі сягає майже сорока умовних одиниць, що відповідає середньому коефіцієнту зміни приблизно 2.2. Така поведінка є характерною для ситуацій, коли сенсор рухається через ділянку простору, де зміна поля відбувається майже рівномірно. Подібний характер просторової динаміки сигналу спостерігається і в інших серіях: деякі залежності демонструють спадання індукції з віддаленням, інші — її зростання, що зумовлено

різною орієнтацією магнітного моменту відносно датчика та початковим зміщенням нульової лінії.

Отримані результати узгоджуються із фізичною моделлю ближньої зони, де на коротких відрізках просторові залежності складних магнітних полів можуть ефективно лінеаризуватися.

5.3.2 Геометричний фактор

У межах невеликого інтервалу відстаней кривизна силових ліній змінюється повільно, а сам датчик перебуває у зоні, де поле ще не переходить у різко нелінійний режим. Через це простір між 0.01 та 0.05 м можна розглядати як фрагмент ширшої кривої, але на цьому фрагменті її поведінка стає близькою до прямої. Така «геометрична рівномірність» забезпечує сталість зміни сигналу з віддаленням і природно приводить до появи лінійної моделі як найточнішої.

5.3.3 Фізичний фактор

У досліджуваному режимі матеріал об'єкта працює без ознак локального насичення або доменної перебудови. Магнітний момент залишається стабільним, а поле — плавним і прогнозованим. За таких умов індукція змінюється так, що її градієнт у вибраному напрямку практично не змінюється. Саме ця стабільність та відсутність складних нелінійних ефектів зумовлюють спостережувану лінійність — поле реагує на зміну відстані рівномірно, без різких стрибків чи викривлень.

5.4 Порівняння з теорією

Порівняння з теоретичними даними передбачається здійснити у два послідовні етапи: на першому етапі буде виконано порівняння отриманих результатів із розрахунковими даними, а на другому етапі заплановано проведення порівняння з результатами моделювання, отриманими за допомогою програмного забезпечення CST

5.4.1 Аналіз та порівняння з розрахунковими даними

У рамках даного розділу розглядається експериментальне дослідження впливу феромагнітного об'єкта на магнітне поле. Для прикладу візьмемо циліндр

У розрахунках використано такі початкові дані:

Магнітна проникність вакууму: $\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7} \text{ Н/А}^2$

Фонове магнітне поле: $B_3 = 50 \text{ мкТл}$

Відносна магнітна проникність сталі: $\mu_c = 500$

Радіус циліндру: $R_{\text{ц}} = 0,0058 \text{ м}$

Довжина циліндру: $h_{\text{ц}} = 0,13 \text{ м}$

Відстань від датчика до краю циліндру: $l = 0,05 \text{ м}$

Об'єм зразка: $V = \pi \times R_{\text{ц}}^2 \times h_{\text{ц}} = 1,726 \times 10^{-6} \text{ м}^3$

Магнітна сприйнятливність матеріалу $\chi = \mu_c - 1 = 499$

З урахуванням демагнітаційного фактора ефективна сприйнятливність визначається рівнянням для перпендикуляру та паралелі відповідно

$$\chi_{\text{еф/перпен}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{перпен}} \times \chi} = 142,78$$

$$\chi_{\text{еф/парал}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{парал}} \times \chi} = 19,229$$

де N — демагнітаційний коефіцієнт для перпендикуляру та паралелі відповідно:

$$N_{\text{перпен}} = 0,05$$

$$N_{\text{парал}} = 0,005$$

Обчислення напруженості зовнішнього магнітного поля:

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0} = 39,789 \text{ А/м}$$

Намагніченість матеріалу для перпендикуляру та паралелі відповідно:

$$M_{\text{перпен}} = V \times \chi_{\text{еф/перпен}} \times H_3 = 0,098 \text{ А/м}^2$$

$$M_{\text{парал}} = V \times \chi_{\text{эф/парал}} \times H_z = 0.013 \text{ А/м}^2$$

Магнітний момент:

$$B_{\text{перпен}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{перпен}}}{\left(l + \frac{h_{\text{ц}}}{2}\right)^3} = 10.264 \times 10^{-6} \text{ мкТл}$$

$$B_{\text{парал}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{парал}}}{\left(l + \frac{h_{\text{ц}}}{2}\right)^3} = 14.202 \times 10^{-6} \text{ мкТл}$$

Наведені вище розрахунки виконані для одного типової геометрії циліндричного зразка та конкретної відстані між об'єктом і датчиком магнітного поля. Вони слугують прикладом повного алгоритму визначення ефективної магнітної сприйнятливості, магнітного моменту та очікуваної індукції магнітного поля у точці вимірювання.

Для інших об'єктів, що досліджувалися у роботі, аналогічна методика застосовувалася без змін: визначалися геометричні параметри зразка, обчислювалася його ефективна магнітна сприйнятливість з урахуванням демагнітаційних коефіцієнтів, після чого проводилися розрахунки індукції магнітного поля на різних відстанях від датчика.

Оцінки виконано для кількох конфігурацій та варіантів орієнтації об'єктів у полі Землі. Усі проміжні й підсумкові значення, отримані в результаті цих розрахунків, наведено у Додатку А, а остаточні результати в таблиці 5.2

Таблиця 5.2 — Результати теоретичних розрахунків для всіх досліджуваних зразків

Об'єкт	ΔB на відстані 0.05 м	ΔB на відстані 0.01 м
Циліндр — поздовжня вісь перпендикулярна до площини датчика	10,264	37

Циліндр — поздовжня вісь паралельна до площини датчика	14,202	979,34
Труба — поздовжня вісь перпендикулярна до площини датчика	16,365	50
Труба — поздовжня вісь паралельна до площини датчика	45,56	1171
Профіль — поздовжня вісь перпендикулярна до площини датчика	27	62,744
Профіль — поздовжня вісь паралельна до площини датчика	25,479	546,1

5.4.2 Особливості чисельного моделювання магнітних аномалій у CST Studio Suite.

Чисельне моделювання в CST Studio Suite ґрунтується на дискретизації геометрії та матеріалів шляхом поділу області симуляції на гексаедральну або тетраедральну сітку, у межах якої інтегральні значення електромагнітних величин розраховуються за методом Finite Integration Technique (FIT) або методом скінченних елементів (FEM). Матеріальні параметри, включно з проникністю та нелінійними В–Н характеристиками, задаються усереднено в межах кожної комірки, що призводить до згладження локальних неоднорідностей та зменшення амплітуди аномалій, особливо для феромагнітних матеріалів з крутою нелінійністю.

Магнітостатичний розв’язувач CST формує поле через поєднання векторного та скалярного потенціалів і забезпечує коректний стаціонарний розрахунок, однак його точність значною мірою залежить від густоти сітки та якості адаптивного уточнення. Моделювання нелінійних ефектів, таких як насичення та гістерезис, виконується за допомогою спрощених макроскопічних моделей (Preisach або Jiles–

Atherton), без явного відображення доменної структури, що додатково зменшує точність опису локальних магнітних збурень.

Граничні умови типу open boundary та PML забезпечують апроксимацію вільного простору, але їх застосування також може впливати на просторову конфігурацію поля в околицях малих об'єктів. Симетричні граничні умови дозволяють зменшити обчислювальну область, але накладають вимоги на геометрію моделі й іноді призводять до штучного обмеження розподілу магнітної індукції.

Унаслідок дискретизації, усереднення та використання спрощених фізичних моделей CST зазвичай демонструє занижену амплітуду локальних аномалій і згладжений профіль поля порівняно з експериментальними даними. Це особливо помітно при моделюванні малих феромагнітних об'єктів (пластина, стрижень, дріт), де реальні ефекти залишкової намагніченості, мікроструктури та дефектів матеріалу не враховуються чисельно. Незважаючи на це, CST забезпечує якісно правильну картину магнітного поля та коректно відтворює тенденції зміни індукції, що дозволяє використовувати його результати для порівняльного аналізу та валідації експериментів.

5.4.3 Порівняння з результатами моделювання в CST

У процесі дослідження магнітометричного методу виявлення металевих об'єктів важливим етапом є визначення просторового розподілу магнітного поля для тіл різної форми та розмірів. Такий аналіз дає змогу оцінити, як змінюється модуль магнітної індукції при збільшенні відстані між об'єктом та площиною сенсора, що є критично важливим для встановлення реальної чутливості та робочого діапазону магнітометра.

Для цього у середовищі CST Studio Suite було виконано серію магнітостатичних моделювань для кількох типових об'єктів. Кожен з них

розглядався у визначеній орієнтації відносно датчика, а аналіз проводили уздовж прямої, що відповідає зміні фактичної дистанції від об'єкта до сенсора. Це дозволило отримати залежності затухання магнітного поля, які надалі порівнювали з експериментальними даними.

Перед проведенням магнітостатичного моделювання у CST Studio Suite було побудовано повний комплект тривимірних моделей усіх досліджуваних об'єктів. Кожна модель створювалася із суворим урахуванням фактичних геометричних параметрів зразка, що дозволяє коректно відтворити взаємодію об'єкта з магнітним полем та мінімізувати похибки між симуляцією та експериментом.

Отримані моделі слугують основою для подальшого розрахунку магнітного поля у близькій та дальній зонах, а також для верифікації експериментальних результатів. На рисунках 5.14–5.18 наведено зовнішній вигляд кожного з об'єктів у робочому просторі CST.

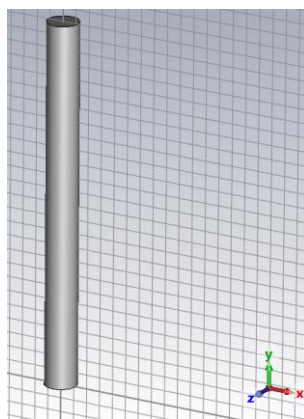


Рисунок 5.14 — Геометрична модель циліндра у CST Studio Suite

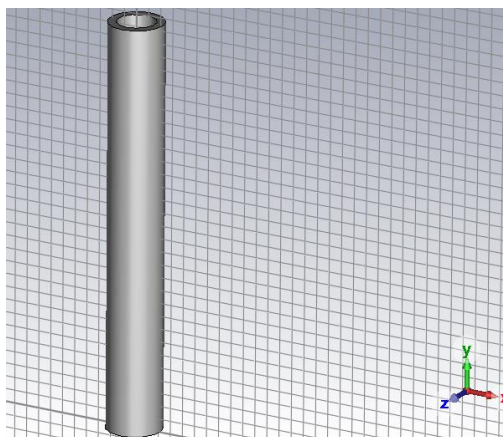


Рисунок 5.15 — Геометрична модель труби у CST Studio Suite

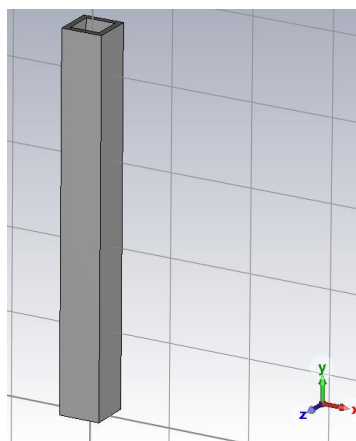


Рисунок 5.16 — Геометрична модель профілю у CST Studio Suite

Для моделювання магнітної взаємодії досліджуваних металевих об'єктів у середовищі CST Studio Suite був використаний матеріал Steel-1010, параметри якого наведено на рисунку 5.19. Цей матеріал є стандартною низьковуглецевою конструкційною сталлю, що добре відповідає реальним механічним і магнітним властивостям досліджуваних зразків. Вибір сталі типу 1010 зумовлений такими факторами: висока магнітна проникність ($\mu \approx 500$), характерна для низьковуглецевих сталей із ферромагнітними властивостями, що дозволяє точно відтворити концентрацію магнітного потоку, яку спостерігаємо в реальних об'єктах; наявність нелінійної В–Н характеристики (Soft-Magnetic-BH), оскільки більшість конструкційних сталей демонструють

нелінійну залежність магнітної індукції від напруженості поля, і така модель дозволяє коректно врахувати ефекти насичення при підвищених рівнях зовнішнього поля; електрична провідність $\sigma = 6.993 \times 10^6$ См/м, що відповідає типовим значенням для сталей та визначає поведінку вихрових струмів, які можуть впливати на розподіл магнітного поля; питома щільність $\rho = 7870$ кг/м³ та супутні механічні параметри, що хоч і не впливають безпосередньо на магнітостатичний розрахунок, але підтверджують відповідність моделі реальній конструкційній сталі. Використання саме Steel-1010 дозволяє максимально наблизити чисельну модель до реальної поведінки металевих об'єктів під дією магнітного поля, що забезпечує коректність подальшого зіставлення результатів моделювання з експериментальними даними.

Steel-1010	
Type	Normal
Epsilon	1
Electric cond.	6.993e+06 [S/m]
Mu	500
Nonlin. mu type	Isotropic
Curve type	Soft-Magnetic-BH
Rho	7870 [kg/m ³]
Thermal cond.	65.2 [W/K/m]
Specific heat	450 [J/K/kg]
Diffusivity	1.84103e-05 [m ² /s]
Young's modulus	205 [kN/mm ²]
Thermal expans.	13.5 [1e-6/K]

Рисунок 5.19 — Параметри матеріалу Steel-1010, використані у моделюванні CST Studio Suite

Для задання зовнішнього магнітного поля у CST Studio Suite використовується вікно Define Magnetic Source Field, скріншот якого наведено на рисунку 5.20. У моделі встановлено однорідне поле, спрямоване вздовж осі Y, із напруженістю $H = 39.8$ А/м. Це значення вибрано на основі середнього рівня магнітної індукції земного поля в районі Києва, яке становить приблизно $B \approx 50$ μ Т. Відповідне значення напруженості розраховується за виразом $H = B/\mu_0$,

де $\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7} \text{ H/A}^2$ — магнітна стала. Підставивши $B = 50 \text{ мкТ}$, отримаємо $H \approx 39.8 \text{ А/м}$.

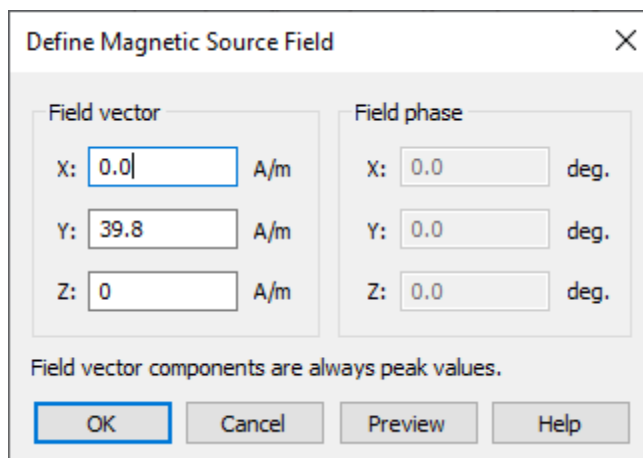


Рисунок 5.20 — Вікно задання однорідного магнітного поля із встановленим вектором уздовж осі Y

На рисунку нижче подано приклад одного з отриманих графіків, який демонструє характер зміни модуля магнітної індукції залежно від відстані до об'єкта.

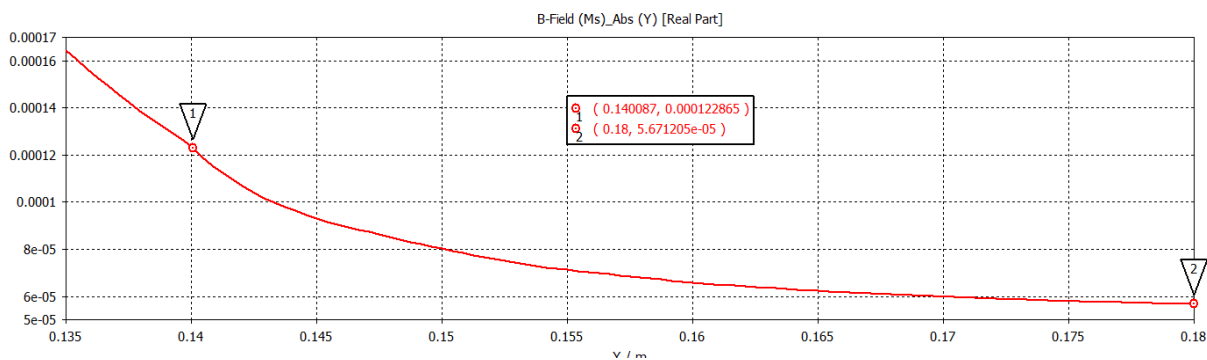


Рисунок 5.21 — Залежність модуля магнітної індукції від відстані між датчиком і циліндром перпендикулярним до нього

На наведеному графіку представлено розрахований рівень магнітного поля у точках, розташованих на різних відстанях від об'єкта. Слід зазначити, що значення, отримані під час моделювання, відповідають сумарному магнітному полю в області реєстрації, яке

включає як природний фон (магнітне поле Землі), так і поле, зумовлене самим металевим об'єктом.

Для подальшого аналізу нас цікавить лише додатковий внесок, який створює об'єкт. Тому з отриманих значень необхідно відняти сталу складову — векторну величину магнітного поля Землі. Після такого коригування залишається лише надлишкове поле, індуковане наявністю об'єкта, що й визначає реальну зміну сигналу на сенсорі магнітометра. А саме на відстані 0.05 м надлишкове поле складає 6,7 мкТ, а на відстані 0,01 м 72,8 мкТ

Порівняння результатів моделювання у CST Studio Suite з експериментальними вимірюваннями демонструє суттєві відмінності у поведінці магнітного поля в ближній та дальній зонах. На відстані 0.01 м програмна модель прогнозує індукцію 72,8 мкТл, тоді як реальний магнітометр фіксує лише 47,27 мкТл. Таке розходження пояснюється тим, що в CST поле вимірюється у математичній точці, яка відображає локальний максимум індукції, тоді як фізичний датчик має певні геометричні розміри і реєструє значення, усереднене по площі чутливого елемента. Крім того, у чисельній моделі матеріал зразка задається повністю однорідним, тоді як реальна сталь містить мікроструктурні дефекти, неоднорідності проникності та залишкові напруження, які знижують ефективність концентрації магнітного потоку. Додатковим фактором є позиційні похибки: у ближній зоні навіть зміщення сенсора на 1–2 мм може помітно впливати на значення індукції. На відстані 0,05 м ситуація змінюється — експериментальні дані (11 мкТл) перевищують модельні значення (6,7 мкТл) насамперед через наявність залишкової намагніченості зразка, яка у чисельній моделі не враховується. Реальна сталь може зберігати власне магнітне поле рівнем 3–6 мТл унаслідок доменної структури та ненульової коерцитивної сили, і саме ця залишкова індукція, повільно спадаючи з відстанню, істотно впливає на

результати у дальній зоні, де основне поле від геометрії зразка вже значно послаблене.

Аналогічно до попереднього прикладу були виконані моделювання для інших досліджуваних об'єктів у двох взаємно орієнтаціях — паралельній та перпендикулярній до датчика. За результатами розрахунків побудовано відповідні залежності індукції від відстані, які подано на рисунках 5.22-5.25. Отримані криві дають змогу порівняти вплив геометрії та орієнтації кожного об'єкта на просторовий розподіл магнітного поля та провести узагальнену оцінку характеру зміни індукції для всіх конфігурацій.

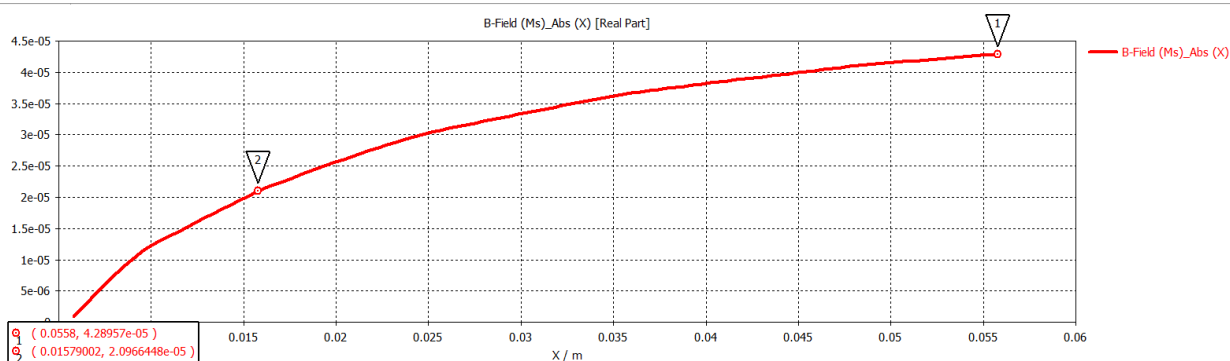


Рисунок 5.22 — Залежність модуля магнітної індукції від відстані між датчиком і циліндром паралельним до нього

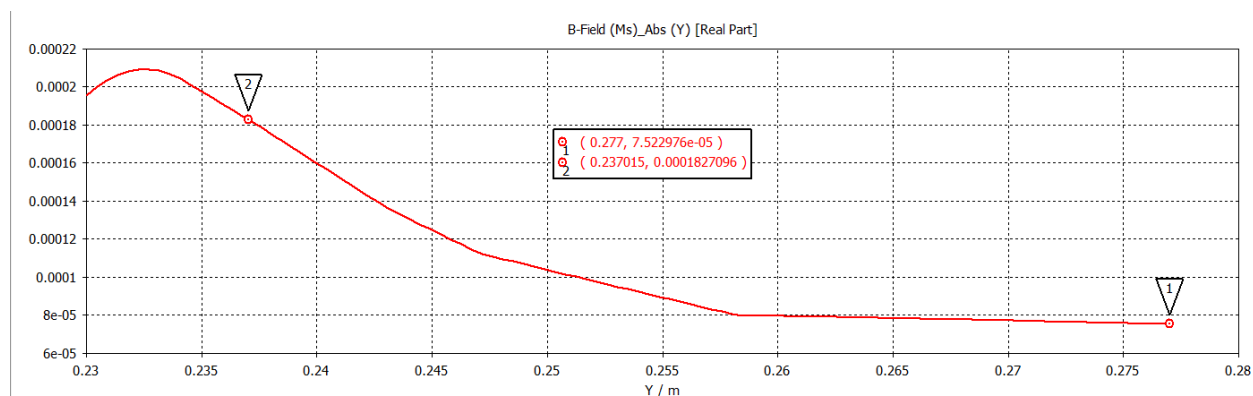


Рисунок 5.23 — Залежність модуля магнітної індукції від відстані між датчиком і профілем, перпендикулярним до нього

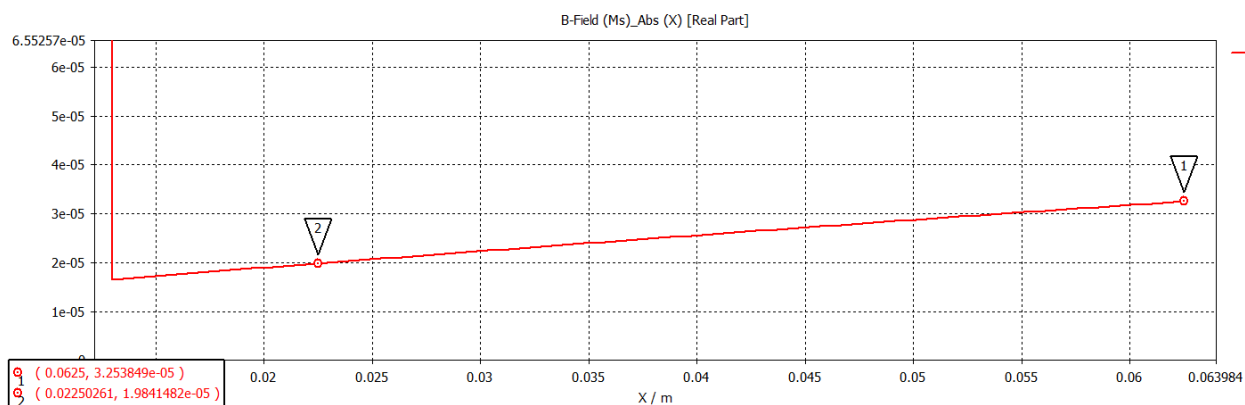


Рисунок 5.24 — Залежність модуля магнітної індукції від відстані між датчиком і профілем паралельним до нього

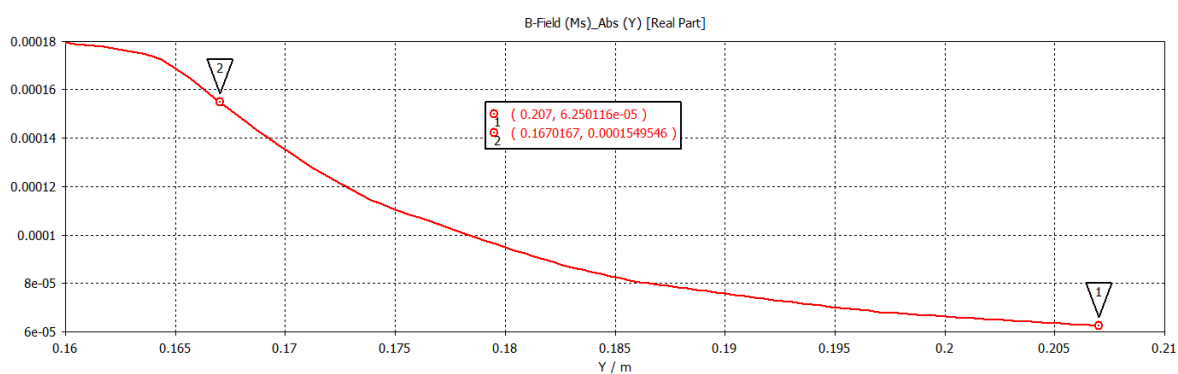


Рисунок 5.25 — Залежність модуля магнітної індукції від відстані між датчиком і трубою перпендикулярною до нього

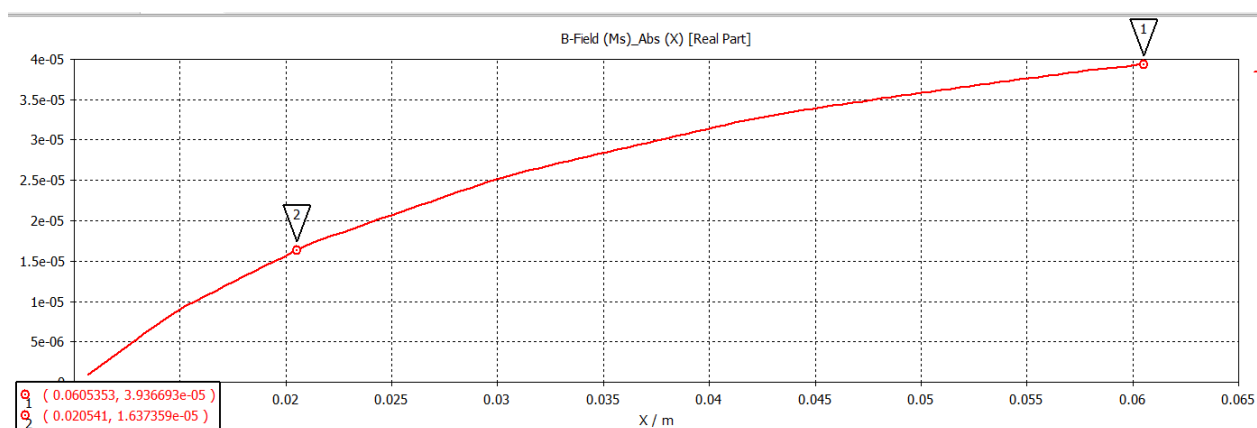


Рисунок 5.25 — Залежність модуля магнітної індукції від відстані між датчиком і трубою паралельною до нього

5.4.4 Порівняння

Після отримання всіх графіків теоретичних розрахунків та результатів практичних вимірювань стало можливим побудувати узагальнену порівняльну діаграму, що відображає співставлення модельних та експериментальних даних для всіх досліджуваних об'єктів. Такі діаграми наведені на рисунках 5.26 –5.30,

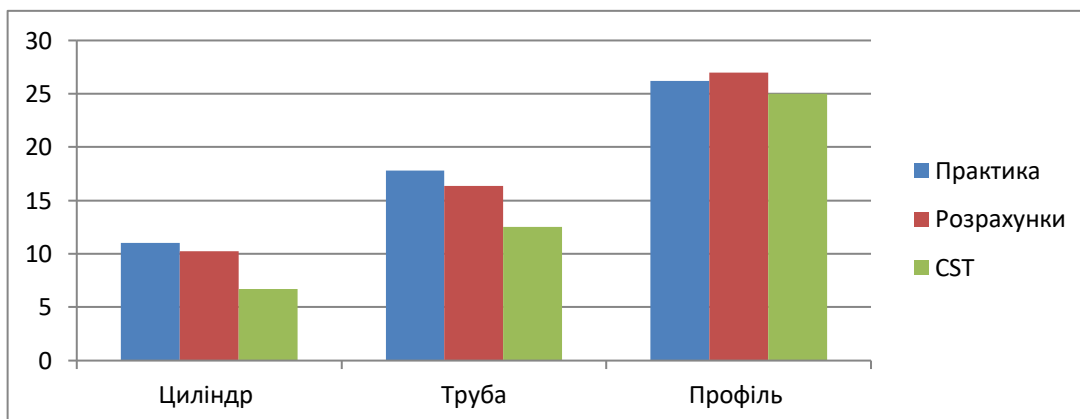


Рисунок 5.26 —Порівняльна діаграма модельних, розрахункових та експериментальних значень магнітної індукції для досліджуваних об'єктів перпендикулярно до датчика на відстані 0.05 м

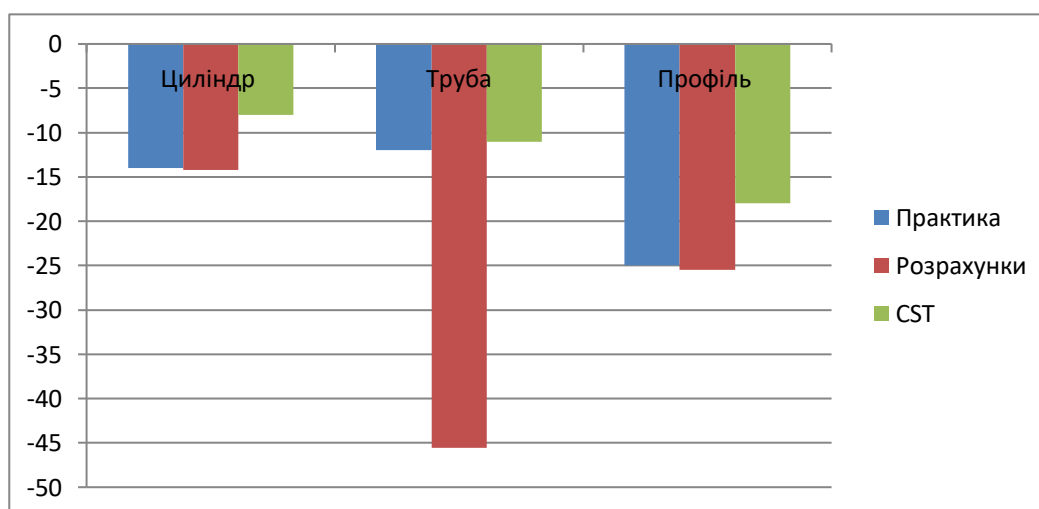


Рисунок 5.27 —Порівняльна діаграма модельних, розрахункових та експериментальних значень магнітної індукції для досліджуваних об'єктів паралельно до датчика на відстані 0.05 м

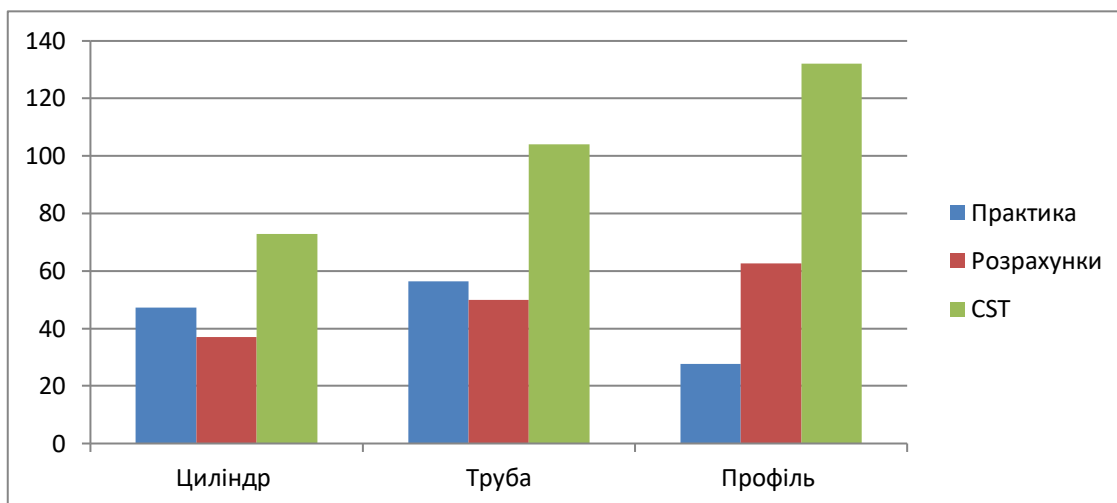


Рисунок 5.28 — Порівняльна діаграма модельних, розрахункових та експериментальних значень магнітної індукції для досліджуваних об'єктів перпендикулярно до датчика на відстані 0.01 м

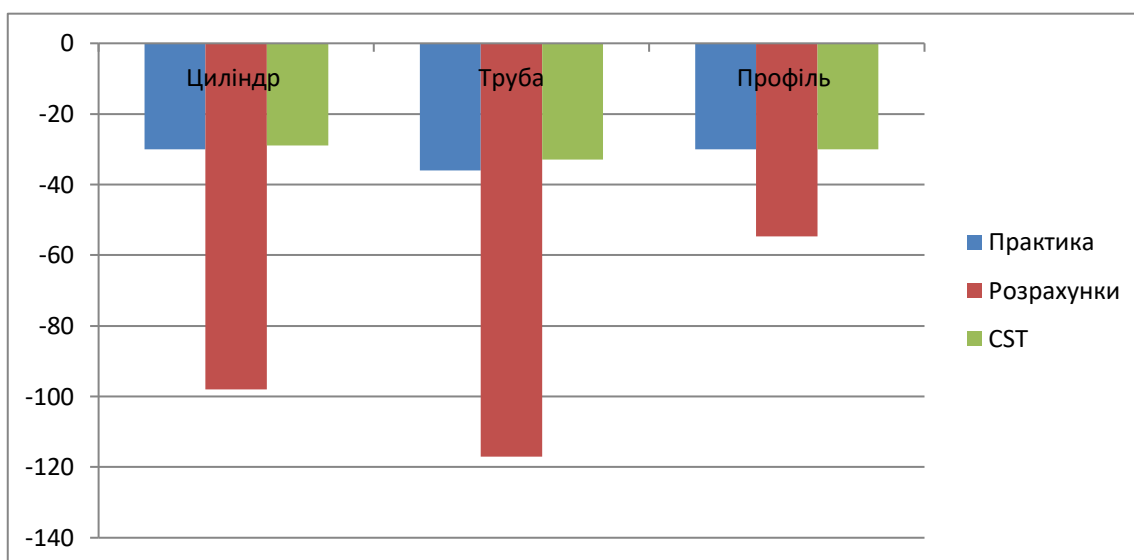


Рисунок 5.29 — Порівняльна діаграма модельних, розрахункових та експериментальних значень магнітної індукції для досліджуваних об'єктів паралельно до датчика на відстані 0.01 м

Порівняння результатів експериментальних вимірювань, аналітичних розрахунків та чисельного моделювання у CST Studio Suite демонструє наявність систематичних відмінностей у величині магнітних аномалій ΔB поблизу феромагнітних об'єктів різної форми. Хоча всі три підходи відтворюють однакові тенденції — залежність аномалії від орієнтації,

відстані та геометрії — кількісні значення нерідко відрізняються, що зумовлено сукупністю фізичних, метрологічних та чисельних факторів.

Першим джерелом розбіжностей є обмеження аналітичної моделі, яка базується на дипольному наближенні та усереднених демагнітаційних коефіцієнтах. Реальні феромагнітні об'єкти мають неоднорідну проникність, мікроструктурні варіації та залишкову намагніченість, що суттєво впливають на локальний розподіл магнітного поля, особливо на малих відстанях. Аналітичні формули припускають ідеальну форму, рівномірну намагніченість та точну орієнтацію, що практично недосяжно в реальному експерименті. Це зокрема пояснює відхилення для труб та профілів у паралельній орієнтації, де аналітичні оцінки дають завищені значення ΔB .

Другим фактором є умови практичного вимірювання та метрологічні особливості магнітометра QMC5883L. Сенсор має власний шумовий рівень, температурний дрейф, різну чутливість осей, а також реагує на паразитні поля навколишнього середовища. Наявність металевих конструкцій, електроніки, проводів та джерел живлення створює додаткові збурення, яких не існує у математичних моделях.

Третьою групою причин є обмеження чисельної моделі CST. Незважаючи на повноцінний тривимірний розв'язок рівнянь Максвелла, CST використовує усереднені матеріальні параметри, ідеалізовану геометрію та точне математичне позиціонування об'єктів. Моделювання не враховує залишкову намагніченість, мікроструктуру сталі чи власні характеристики магнітометра. Крім того, дискретизація та усереднення на сітці природно знижують амплітуду локальних аномалій та згладжують градієнти поля, що було докладно розглянуто у попередньому підрозділі.

Попри відмінності в абсолютних значеннях, усі методи узгоджено підтверджують основні закономірності: швидке зростання ΔB при зменшенні відстані, різницю між паралельною й перпендикулярною

орієнтаціями, а також залежність інтенсивності аномалії від розміру та об'єму об'єкта. Чутливість датчика QMC5883L у діапазоні 10–130 мкТл дозволяє впевнено реєструвати такі зміни.

Таким чином, наявність розбіжностей між аналітичними оцінками, моделюванням у CST та експериментом є природним наслідком різних рівнів абстракції та точності, закладених у кожен підхід. Водночас якісна узгодженість результатів підтверджує коректність застосованої методики та ефективність магнітометричного підходу до виявлення феромагнітних об'єктів.

5.5 Просторовий розподіл магнітної індукції

Для аналізу просторової структури магнітних аномалій у присутності феромагнітних об'єктів різної геометрії в CST Studio Suite були побудовані візуалізації магнітного поля у вигляді векторних діаграм та карт модулів індукції. Це дозволяє оцінити як величину вектора B , так і напрямок силових ліній. Висока густина векторів поблизу поверхні об'єктів пояснюється адаптивним уточненням сітки, яке CST автоматично виконує в областях із значними градієнтами індукції, підвищуючи локальну точність.

На рисунку 5.31 показано моделювання сталевого суцільного циліндра під кутом до координатних осей. Колірна карта відображає максимальну концентрацію магнітного потоку в центрі об'єкта, а векторні стрілки демонструють характерне дипольне викривлення поля.

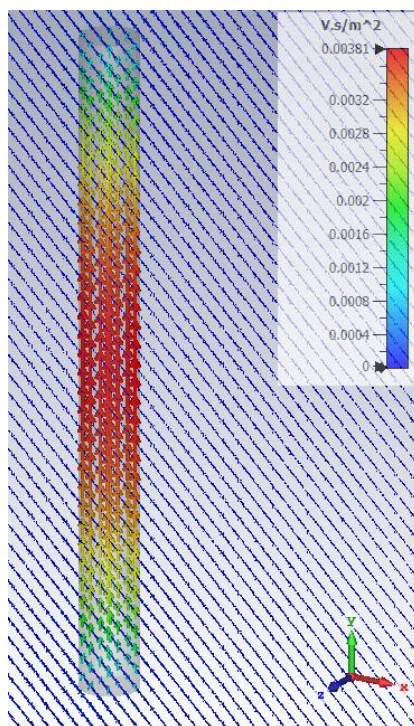


Рисунок 5.31 — Розподіл магнітної індукції навколо сталевого циліндричного стрижня.

Рисунок 5.32 ілюструє модель порожнистої сталеві труби. Аномалія має дуальний характер: підвищення індукції спостерігається на краях стінки, тоді як всередині формуються зони часткового розвантаження поля.

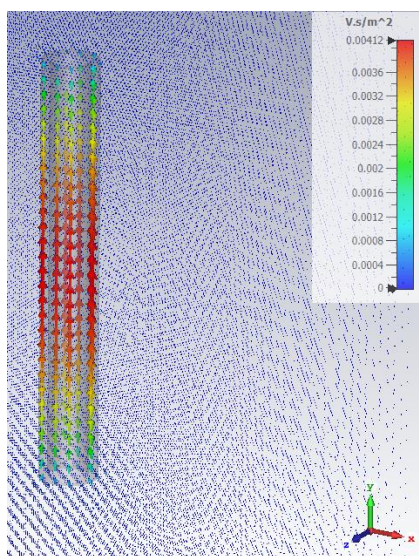


Рисунок 5.32 — Розподіл магнітної індукції навколо сталеві труби.

На рисунку 5.33 представлено сталевий профіль прямокутного перерізу, який створює асиметричне викривлення поля. Аномалії концентруються в ділянках з найбільшою товщиною матеріалу, що формує різні градієнти по осях. Така поведінка важлива для практичного детектування, оскільки ΔV залежить від орієнтації профілю.

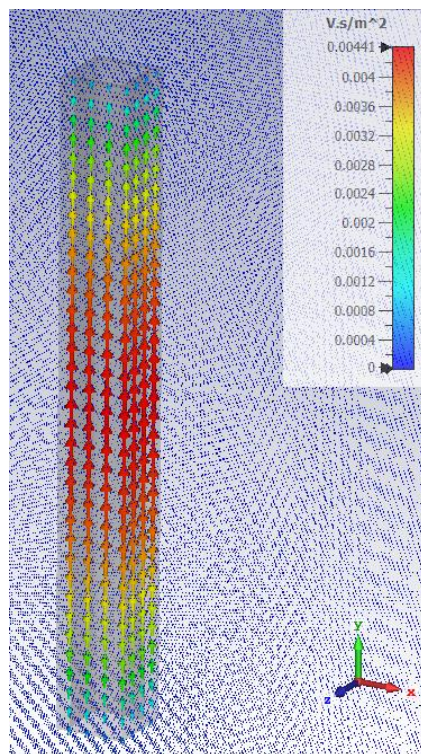


Рисунок 5.33 — Розподіл магнітного поля навколо сталевого профілю прямокутного перерізу.

6. ПОРІВНЯННЯ МАГНЕТОМЕТРІВ

6.1 Стійкість до завад

Магнітометрична схема характеризується високою чутливістю до змін зовнішнього магнітного середовища, оскільки вимірює абсолютні значення та просторові компоненти вектора магнітної індукції. Будь-які варіації геомагнітного поля, а також техногенні магнітні збурення від ліній електропередач, трансформаторів або електромеханічних агрегатів призводять до появи додаткових складових сигналу, які можуть бути співрозмірними з корисною аномалією. Значний вплив також справляє орієнтація сенсора у просторі, яка змінює проєкції вектора магнітної індукції на вимірювальні осі.

З метою підвищення стійкості до завад магнітометрична система потребує впровадження цифрових та апаратних методів компенсації: згладжування низькочастотних флуктуацій, вилучення постійної складової фону, застосування алгоритмів калібрування типу *hard-iron* і *soft-iron*, а також фільтрації пульсацій живлення за допомогою низькоомних конденсаторів. Сукупність цих заходів забезпечує стабільну роботу сенсора в умовах змінного магнітного фону.

Індукційна схема, навпаки, не реагує на статичні магнітні поля, оскільки її робота базується на зміні частоти генератора LC-контур. Однак така схема є чутливою до радіочастотних перешкод, коливань напруги живлення та температурного дрейфу елементів. Для мінімізації цих впливів у металодетекторі FM-2 застосовано стабілізатор LM317 та екранування котушки, що дозволяє утримувати частоту генератора у робочому діапазоні з достатньою стабільністю.

Проведені експериментальні вимірювання підтверджують чутливість FM-2 до зовнішніх умов: навіть при відстанях 0.01–0.05 м різні типи

металевих об'єктів викликають частотні зсуви у межах від $-2,2$ до $-49,4$ Гц, що демонструє залежність частотної аномалії від геометрії та орієнтації об'єкта. Отримані дані використовуються далі при компаративному аналізі двох підходів детектування.

6.2 Конструктивна складність та практичність реалізації

Магнітометричний метод характеризується відносно невисокою апаратною складністю, оскільки для його функціонування немає потреби в створенні власного електромагнітного поля. Основними компонентами конструкції є тривісний цифровий магнітометр QMC5883L, мікроконтролер для збору і обробки інформації, а також простий індикаторний модуль звукоsvітлової сигналізації. В цій архітектурі немає високочутливих резонансних контурів, а фізичний принцип функціонування не потребує використання пошукової котушки, що звільняє розробника від потреби точно дотримуватися індуктивності, геометрії та щільності намотування. Це значно зменшує рівень складності в процесі виготовлення і підвищує стабільність конструкції в умовах навчальної або лабораторної бази.

Програмна складова пристрою також відіграє істотну роль. Обробка даних, цифрова фільтрація, нормалізація та індикація виконуються мікроконтролером і можуть бути просто змінені або доповнені. Це дає змогу гнучко регулювати чутливість, впроваджувати нові алгоритми обробки сигналу, виконувати експерименти зі згладжуванням, виявленням піків та компенсацією фону. Отже, магнітометрична система фактично є платформою, керованою програмним забезпеченням для дослідницьких цілей, де основна увага приділяється обробці даних, а не точності апаратного забезпечення.

На відміну від цього, індукційний металодетектор ВФО характеризується більш складною будовою. Присутність пошукової

катушки та LC-генератора ставить вимоги до точності намотування, стабільності індуктивності, якості екранування та зменшення паразитних параметрів. Будь-яке відхилення в геометрії катушки змінює її індуктивність, що безпосередньо відображається на частоті генератора та його температурній стабільності. Також, функціонування генераторного вузла потребує уважного вибору конденсаторів, врахування їх температурних характеристик та перевірки якості контактних з'єднань. Стабільне живлення, впроваджене в ВФО, також є істотним чинником, оскільки коливання напруги можуть викликати дрейф частоти.

Експериментальні спостереження під час порівняння двох методів засвідчили, що ВФО демонструє досить стабільні та повторювані зміни частоти при наближенні металевих предметів. Характер Δf вдало відображається, проте абсолютні показники частотного зсуву в значній мірі залежать від точності виробництва та налаштування пошукової катушки. Це підтверджує загальну тенденцію: індукційні детектори вимагають більшої потужності в апаратному забезпеченні, але забезпечують стабільну роботу при належній налаштуванні.

У відповідній таблиці розділу 4.2 представлено всі числові результати експериментальних вимірювань, що дає змогу наочно порівняти амплітуди частотних змін і стабільність роботи ВФО за різних умов.

6.3 Можливості аналізу сигналів

Магнітометрична схема дозволяє отримати повний набір тривимірних компонент магнітної індукції, які формують векторне представлення магнітного поля в точці вимірювання. Цей підхід дає змогу не тільки фіксувати присутність аномалії, але й досліджувати її просторову структуру. Завдяки наявності даних про кожен з осей,

можливо відтворити орієнтацію металевого об'єкта, оцінити його форму та визначити характер взаємодії матеріалу з магнітним полем. Окрім цього, тривимірний сигнал підходить для використання чисельних методів обробки, що охоплюють цифрову фільтрацію, адаптивні згладжувальні процеси, статистичне усереднення та алгоритми класифікації. Комплекс цих можливостей збільшує точність визначення місцезнаходження об'єкта та створює нові можливості для вирішення інверсійних задач реконструкції.

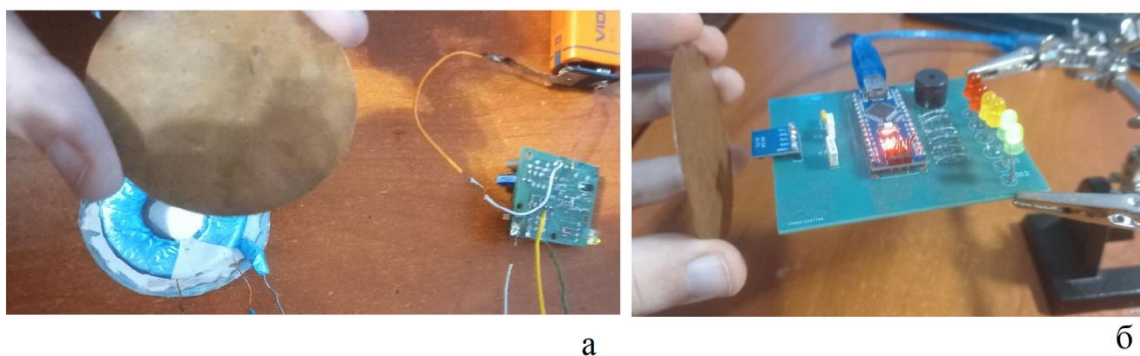


Рисунок 6.1 — Порівняльна реакція WFO (а) та магнітометричного металодетектора (б) на об'єкт із міді



Рисунок 6.2 — Порівняння відстані реакція WFO (а) та магнітометричного металодетектора (б) на феромагнітного об'єкта

На рисунках 6.1 і 6.2 показано порівняння реакції індукційного металодетектора типу ВФО та магнітометричної системи при наближенні мідного і максимальна відстань реакції на феромагнітний об'єкт Реакція пристроїв відображається за допомогою світлодіодної індикації: при виявленні металу спостерігається загоряння світлодіодів.

Результати експерименту свідчать про те, що індукційний металодетектор типу ВФО демонструє помітну реакцію на мідний об'єкт завдяки впливу провідного матеріалу на індуктивність пошукової котушки. Водночас магнітометрична система ефективніше реагує на феромагнітний зразок навіть на більшій відстані 0.2 м у порівнянні з 0,1 м у ВФО, оскільки реєструє локальні спотворення фоновому магнітного поля. Отримані результати підтверджують принципову відмінність фізичних механізмів роботи індукційного та магнітометричного методів детектування.

Індукційний метод, що застосовується в металодетекторі ВФО, ґрунтується на дослідженні зміни частотних параметрів генераторного контуру. Попри те, що цей метод має лише один скалярний параметр — частоту генератора, його інформативність виявляється достатньою для проведення первинної ідентифікації металевих об'єктів за особливостями і розміром частотного зсуву. Експериментальні вимірювання показали стабільну реакцію частотного контуру на метал, що виявляється у зменшенні частоти генератора в межах від приблизно -6,86Гц до майже -49,4Гц залежно від зразка та його орієнтації. Важливі зміни частоти, зафіксовані в експериментах на відстанях 0,05 та 0,01 м, підтверджують здатність ВФО виконувати базову дискримінацію металів залежно від їх впливу на індуктивність котушки.

Незважаючи на одновимірність сигнальної моделі, частотний підхід відзначається значною продуктивністю та стійкістю до завад у реальних умовах. Його простота забезпечує стабільні результати навіть за

наявності коливань магнітного фону, що є труднощами для магнітометричних систем. Одночасно магнітометричний метод, хоча й вимагає більш складної цифрової обробки для нейтралізації фонового поля, надає значно більше інформації та можливості для глибокого аналітичного дослідження еталонної індукційної системи для порівняння з магнітометричним підходом, що реалізований у даній роботі.

7. ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ

7.1 Заміна датчика

Заміна стандартного датчика QMC5883L на більш досконалі модулі є одним з простих, але дієвих методів підвищення точності магнітометричного металошукача. Хоча QMC5883L відрізняється доступністю, він демонструє відносно високий рівень шумів і недостатню температурну стабільність, що негативно позначається на чутливості та відтворюваності результатів вимірювань.

Ефективною альтернативою виступають датчики LIS3MDL, MMC5983MA та RM3100. Їх переваги полягають у зниженому рівні власного шуму, покращеній роздільній здатності та більш стабільній роботі в умовах мінливого зовнішнього магнітного поля. Всі вони сумісні зі стандартними інтерфейсами I²C або SPI, що робить їх інтеграцію простою з поширеними мікроконтролерними платформами, такими як ESP32, Raspberry Pi та STM32.

Використання одного з перелічених датчиків дозволяє збільшити дистанцію виявлення об'єктів, підвищити точність визначення варіацій магнітного поля та мінімізувати кількість помилкових спрацювань. Це значно розширює функціональні можливості системи в реальних умовах використання.

7.1.1 LIS3MDL

LIS3MDL від STMicroelectronics є одним із найбільш придатних варіантів для модернізації магнітометричного металодетектора, оскільки поєднує високу чутливість, низький шум та простоту інтеграції. Датчик забезпечує роздільну здатність до 16 біт і має рівень шуму менше 0,1 мГс RMS, що суттєво знижує флуктуації сигналу порівняно з QMC5883L.

Завдяки гнучкому діапазону вимірювань (± 4 , ± 8 , ± 12 або ± 16 Гс) він здатний точніше фіксувати слабкі локальні зміни магнітного поля, які виникають у присутності дрібних металевих об'єктів. LIS3MDL легко підключається через інтерфейс I²C або SPI до таких платформ, як ESP32 чи Raspberry Pi, що дозволяє реалізувати як просте зчитування даних, так і розширені функції — передавання даних по Wi-Fi, обробку в реальному часі та використання готових бібліотек. Вбудований FIFO-буфер забезпечує ефективне читання без пропуску вибірок, а краща температурна стабільність зменшує дрейф показів під час тривалої роботи.



Рисунок 7.1— Магнітометр LIS3MDL як приклад високочутливого сенсора

Заміна QMC5883L на LIS3MDL дозволяє збільшити дальність виявлення орієнтовно на 50–100 % та зменшити кількість хибних спрацьовувань завдяки нижчому рівню шуму і стабільнішій роботі.

7.1.2 MMC5983MA

MMC5983MA від MEMSIC є одним з найточніших цифрових магнітометрів у своєму класі та вирізняється дуже низьким рівнем шуму — близько 0,05 мГс RMS при діапазоні вимірювань ± 8 Гс і роздільній здатності 18 біт. Завдяки таким характеристикам сенсор здатний реєструвати надзвичайно малі зміни магнітного поля, зокрема від дрібних

металевих частинок або слабо намагнічених об'єктів. Датчик має високу стійкість до зовнішніх електромагнітних завад та оснащений функцією автоматичного калібрування, що забезпечує стабільність показів і спрощує інтеграцію в готові системи.

MMC5983MA добре працює з різними контролерами та одноплатними комп'ютерами: він легко інтегрується із STM32 (з використанням CubeMX для швидкої конфігурації), підходить для ESP32 у середовищі ESP-IDF, а на Raspberry Pi може застосовуватися для безперервного логування та обробки даних у реальному часі. Низьке енергоспоживання робить датчик придатним для портативних та автономних систем. Його застосування дозволяє суттєво знизити рівень шуму системи, підвищити точність та покращити здатність приладу виявляти слабкі магнітні аномалії.

7.1.3 RM3100

RM3100 від PNI Sensor Corporation належить до професійного класу високочутливих індукційних магнітометрів і значно перевершує типові MEMS-рішення за точністю та стабільністю. Сенсор має наднизький рівень шуму — приблизно $15 \text{ нГс}/\sqrt{\text{Гц}}$, діапазон вимірювань до $\pm 200 \text{ мГс}$ та 24-бітну роздільну здатність. Завдяки таким параметрам він здатний фіксувати дуже слабкі магнітні градієнти та виявляти масивні металеві об'єкти на глибині до 1–2 метрів, що робить його придатним для геофізичних задач, пошукових приладів та систем просторового аналізу поля.

Датчик має вбудовані механізми компенсації та відзначається високою температурною стабільністю, що мінімізує дрейф і підвищує повторюваність вимірювань. RM3100 сумісний із такими платформами, як Raspberry Pi Pico або ESP32-S3, де можна реалізувати складні методи обробки сигналів — фільтр Калмана, спектральний аналіз або елементи

AI-аналізу даних. Застосування цього сенсора дозволяє значно збільшити глибину виявлення та навіть аналізувати форму або розмір об'єкта за просторовими градієнтами магнітного поля.

7.2 Застосування масиву датчиків

Масив датчиків. Ефективним способом підвищення чутливості та завадостійкості магнітометричного металодетектора є використання масиву з 2–4 магнітометрів, розташованих на певній відстані один від одного (рис. 10.2). Наприклад, застосування декількох LIS3MDL дозволяє отримувати додаткову інформацію про просторові градієнти магнітного поля, що суттєво покращує точність виявлення та дає можливість визначати напрямок на металевий об'єкт. Така конфігурація також зменшує вплив неоднорідного зовнішнього магнітного фону, оскільки дозволяє порівнювати покази з кількох точок одночасно. Реалізувати подібний масив на базі ESP32 можна за допомогою мультиплектора І²С або використанням окремих SPI-каналів, що забезпечує стабільну роботу навіть при високій частоті зчитування.

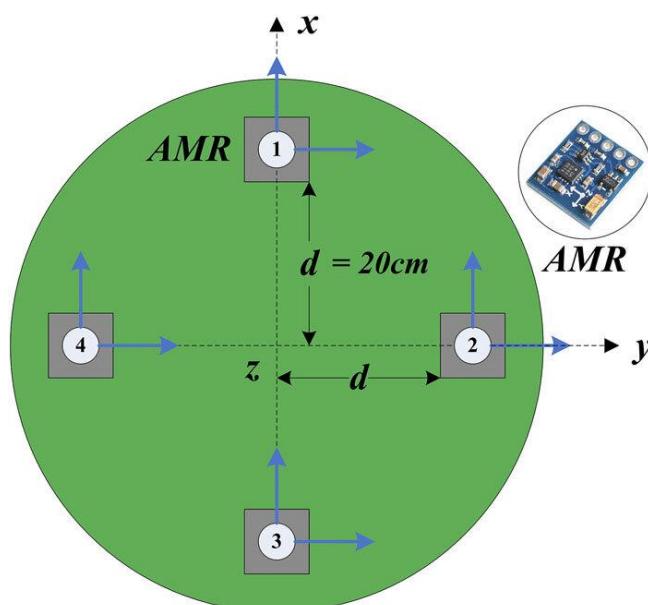


Рисунок 10.2 — Схема масиву магнітометричних датчиків для аналізу просторових градієнтів магнітного поля

Хоча сучасні магнітометри мають вбудовані цифрові фільтри, додаткова програмна обробка сигналу залишається важливою для забезпечення стабільності в реальних умовах. Доцільно застосовувати температурну компенсацію з використанням NTC-термістора, що зменшує дрейф показів при коливаннях температури. Додаткове екранування чутливих елементів металом дозволяє знизити вплив сторонніх магнітних перешкод, особливо поблизу джерел електричних струмів або феромагнітних конструкцій. Поєднання цих заходів покращує точність, зменшує рівень шуму та забезпечує більш стабільну роботу детектора у змінному магнітному середовищі.

8. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛОДЕТЕКТОРУ

Створений в рамках магістерської дисертації металодетектор, який базується на вимірюванні локальних варіацій магнітного поля, може бути впроваджено в промисловості, науці та інженерії. На відміну від класичних індукційних систем, що функціонують завдяки створенню змінного чи імпульсного електромагнітного поля, магнітометричний підхід дозволяє досліджувати вже існуюче магнітне середовище. Це дозволяє працювати в ситуаціях, де небажано або складно технічно генерувати потужні електромагнітні імпульси, а також у випадках, коли потрібно виявляти великі аномалії поля, спричинені наявністю феромагнітних об'єктів.

У промислових процесах така технологія може виявитися корисною для початкового контролю, локального аналізу та високоточних вимірювальних процедур, які не потребують великих або коштовних систем неруйнівного контролю.

8.1 Контроль якості та неруйнівний контроль (NDT)

У промисловій неруйнівній діагностиці магнітні методи контролю посідають важливе місце завдяки здатності реєструвати локальні зміни магнітного поля, спричинені дефектами у феромагнітних матеріалах. Мікротріщини, внутрішні включення, порушення кристалічної структури та зони підвищених механічних напружень формують характерні магнітні аномалії, що можуть бути зафіксовані чутливими магнітометричними сенсорами без необхідності руйнування конструкції.

Магнітометричний модуль на основі **QMC5883L** є компактним і високочутливим інструментом, придатним для:

первинної діагностики сталевих балок і профільних елементів;

виявлення дефектів у трубопроводах, зокрема у зонах зварних швів;
моніторингу ділянок потенційного зародження тріщин у феритних
сталях;

локалізації внутрішніх неоднорідностей у масивних металевих
компонентах.

Перевагою магнітометричного методу є відсутність необхідності
створювати сильне зовнішнє магнітне збудження: сенсор реєструє
власний магнітний розподіл об'єкта, змінений через наявність дефектів.

Нижче наведено порівняння розподілу магнітної індукції для
цілісного сталевго циліндра ($R = 5.8$ мм, $L = 130$ мм) та циліндра з
локальним прямокутним вирізом 0.2×0.2 мм, отримане за допомогою
моделювання.

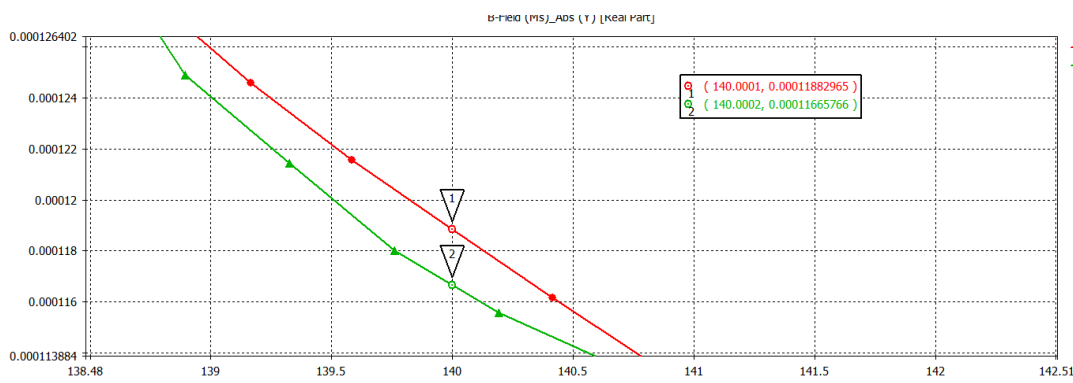


Рисунок 8.1 — Порівняння розподілу магнітної індукції для циліндра
та циліндра з вирізом

Аналіз графіка показує, що після віднімання постійної складової
магнітного поля Землі різниця між кривими становить близько 2.2 мкТ у
робочому діапазоні вимірювання. Така зміна відповідає локальному
порушенню суцільності матеріалу площею менше ніж 0.04 мм².
Враховуючи малі геометричні розміри дефекту, зафіксована аномалія є
фізично очікуваною та свідчить про високу чутливість магнітометричної
системи до точкових неоднорідностей.

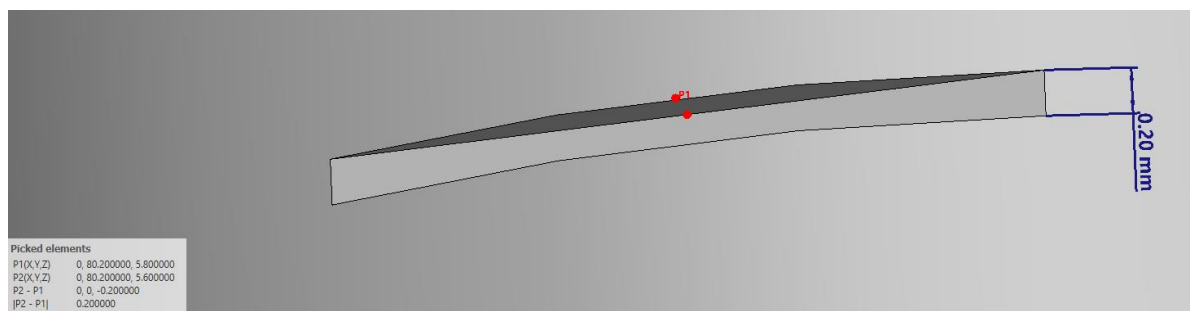


Рисунок 8.2 — Геометрія локального виріза 0.2×0.2 мм у сталевому циліндрі

Таким чином, результати моделювання та експериментальних вимірювань підтверджують можливість використання магнітометричної схеми з датчиком QMC5883L для неруйнівного виявлення дрібних дефектів сталевих елементів. Детектор демонструє здатність розрізняти локальні варіації магнітного поля порядку кількох мікро Тесла, що робить його перспективним інструментом для попереднього польового контролю та технічної діагностики.

8.2 Виявлення прихованих металевих об'єктів у будівельних конструкціях

Металодетектори на основі магнітометрії ефективно використовуються для неруйнівного контролю будівельних конструкцій, особливо під час ремонтних і монтажних робіт, коли потрібно встановити розташування прихованих металевих частин. На відміну від індукційних детекторів, що залежать від електропровідності матеріалів та вихрових струмів, магнітометричний метод фіксує зміни природного магнітного поля, що забезпечує стабільніші результати в складних середовищах, зокрема в бетоні чи великих стінах.

Пристрій може застосовуватися для виявлення арматурних стержнів у залізобетонних плитах, ідентифікації сталевих профілів у конструкціях з гіпсокартону, виявлення металевих труб і кабельних оболонки, захованих у стінах чи підлозі. Завдяки високій чутливості магнітометра

можна точно встановити точки, де свердління є безпечним, зменшуючи ризик ушкодження інженерних мереж або конструктивних складових.

Головною перевагою магнітометричного методу є те, що пристрій не генерує власне електромагнітне випромінювання і функціонує лише як пасивний датчик. Це дає можливість використовувати його разом з медичними або лабораторними пристроями, котрі потребують низького рівня зовнішніх електромагнітних полів. В кінцевому підсумку, магнітометричний металодетектор є ефективним і надійним засобом для точної ідентифікації прихованих металевих об'єктів у будівельних структурах.

8.3 Використання у вибухонебезпечних середовищах

У секторах, де присутні вибухові газові або парові суміші — зокрема в нафтохімічній, хімічній, фармацевтичній та харчовій галузях — існують надзвичайно високі вимоги до безпеки виміральної техніки. Пристрій, що здатен генерувати сильні імпульси струму, іскри або локальне перегрівання провідників, вважається потенційно небезпечним. Саме з цієї причини традиційні імпульсні РІ-металодетектори, що функціонують завдяки значним струмовим викидам через індуктивність котушки, не дозволяються до використання в таких умовах. Їхня діяльність супроводжується короткими, але дуже сильними піковими струмами, які можуть викликати електромагнітні завади або навіть іскрові мікророзряди на контактах.

На відміну від них, магнітометричний детектор працює на зовсім іншому фізичному принципі: він не створює власне магнітне поле, а лише фіксує природні зміни індукції. Робочі сигнали характеризуються наднизькою амплітудою та енергетичним рівнем, що виключає можливість виникнення високовольтних процесів чи імпульсного перегріву елементів схеми. Відсутність потужних коливальних контурів

та імпульсних джерел струму перешкоджає електромагнітній індукції в сусідньому технологічному обладнанні, що є особливо важливим, наприклад, у зонах з електронними лічильниками, датчиками тиску або вибухозахисними клапанами.

Окрім цього, магнітометрична система здатна працювати навіть у середовищах з високим вмістом легкозаймистих парів, зокрема бензолу, ацетону, етанолу та інших речовин, де будь-який електричний імпульс може викликати займання. Через відсутність активного випромінювання і низьку теплову потужність компонентів така система відповідає основним стандартам вибухозахисту та може використовуватися в технологічних зонах, де заборонені індукційні та імпульсні детектори.

Отже, магнітометричний металодетектор є надійним і безпечним пристроєм для виявлення металевих предметів у небезпечних середовищах, гарантує мінімальний ризик для технологічних систем та працівників.

8.4 Аерокосмічна й оборонна галузь

У виробництві авіаційної та оборонної техніки контроль якості матеріалів та конструктивних елементів має особливо високу важливість, оскільки навіть незначні феромагнітні включення, залишки інструментів чи сторонні металеві фрагменти можуть призвести до критичних відмов, зниження ресурсу вузлів або виникнення небезпечних експлуатаційних режимів. Композитні матеріали, широко застосовувані в сучасному літакобудуванні та ракетних системах, характеризуються високою міцністю, але водночас є вразливими до появи дрібних металевих часток, що потрапляють під час виробництва або ремонту. Їх своєчасне виявлення є необхідною умовою забезпечення надійності конструкції.

Магнітометричний детектор може використовуватися для пошуку металевих включень у композитних панелях, де індукційні методи

нерідко мають знижену ефективність через низьку електропровідність базового матеріалу. Чутливість магнітометра до спотворень природного магнітного поля дозволяє фіксувати навіть дрібні феромагнітні частинки, розташовані в товщі панелі або між шарами композиту. Аналогічно, прилад може застосовуватися для контролю зовнішньої обшивки літальних апаратів, де сторонні металеві елементи можуть спричинити локальні напруження або порушення аеродинамічних характеристик.

У практиці технічного обслуговування авіаційної та військової техніки магнітометричний детектор може виконувати функцію інструмента перевірки післяремонтних робіт. Наявність залишеного інструменту, металевої стружки або дрібних елементів кріплення здатна спричинити серйозні інциденти — від порушення кінематики механізмів до повної втрати працездатності виробу. Використання магнітометра дозволяє швидко перевірити порожнини, корпуси та закриті секції без їхнього розбирання.

Окремий напрям застосування — контроль боєприпасів, контейнерів і спеціальних виробів на наявність небажаних металевих включень або сторонніх предметів. Завдяки відсутності активного електромагнітного збудження, прилад не впливає на електронні компоненти й може застосовуватися у зонах з підвищеними вимогами до безпеки.

Компактність конструкції, відсутність складних генераторних вузлів та мінімальні вимоги до калібрування роблять магнітометричний металодетектор зручним інструментом для експрес-діагностики в умовах виробництва, технічного обслуговування та перевірок у аерокосмічній і оборонній галузях.

8.5 Моніторинг магнітних завад у роботизованих системах

У сучасних роботизованих системах та автоматизованих виробничих лініях активно використовуються магнітні енкодери, датчики Холла та

інші системи позиціонування, які функціонують на основі точних вимірювань магнітних полів. Ці сенсори гарантують високу точність виявлення кутових і лінійних переміщень, регулювання швидкості та зворотний зв'язок для сервомоторів. Однак їх правильне функціонування в значній мірі залежить від магнітної чистоти робочого середовища. Присутність зовнішніх металевих об'єктів або феромагнітного пилу може спричинити зміщення магнітного поля, що веде до помилок у визначенні місця, збоїв у функціонуванні приводів або нестабільності контрольних алгоритмів.

Магнітометричний детектор може ефективно застосовуватися для перевірки робочих зон на виявлення дрібного феромагнітного сміття, що накопичується через зношування механізмів або під час технічного обслуговування. Виявлення подібних частинок сприяє запобіганню несподіваним збоєм і підвищенню надійності високоточних систем приводу. Крім того, детектор дозволяє виявляти джерела локальних магнітних аномалій, які можуть бути пов'язані з ушкодженими магнітами, розмагнічуванням або механічними дефектами компонентів енкодерів.

На конвеєрних і транспортувальних лініях пристрій може використовуватися для швидкої діагностики стану техніки без перерви в виробничому процесі. Швидкий аналіз із використанням магнітометра дозволяє виявити приховані металеві частини, що проникли в приводні модулі, або виявити зони з порушенням магнітного балансу.

Окремим напрямом використання є оцінка функціонування магнітних сенсорів після ремонту або оновлення. Магнітометр дає можливість перевірити створення магнітного поля, коректність нульового зміщення та стабільність вимірювань, що є важливим для забезпечення точності позиціонування в роботизованих системах.

Завдяки малогабаритності та легкості експлуатації магнітометричний детектор може функціонувати як засіб швидкої діагностики в умовах автоматизованого виробництва, забезпечуючи стабільність та безперервність роботи сенсорних систем, чутливих до магнітів.

8.6 Застосування у гірничодобувній промисловості та геофізиці

Магнітометричні методи історично мають суттєве значення в гірничій промисловості, головним чином у геологорозвідці, картографуванні родовищ і дослідженні магнітних аномалій. Використання портативного магнітометричного вимірювача значно розширює можливості локального аналізу, даючи змогу здійснювати вимірювання безпосередньо у ближньому зоні, де важкі пристрої або стаціонарні установки недоступні.

Компактний детектор здатний виявляти магнітні включення в рудних зразках, що дозволяє швидко оцінити їхню якість та попередньо встановити мінеральний склад. У процесах збагачення апарат забезпечує швидкий контроль за вмістом магнітних елементів, знижуючи необхідність у складних лабораторних дослідженнях. Пристрій також підходить для виявлення металевих об'єктів у шахтах — як природного походження, так і сторонніх предметів, які можуть загрожувати безпеці персоналу.

Завдяки здатності виявляти незначні локальні зміни магнітного поля, пристрій також є корисним для дослідження поверхневих аномалій, що можуть свідчити про присутність рудних тіл або тектонічних структур. Компактність і зручність у використанні перетворюють магнітометричний детектор на дієвий інструмент для польових геологічних досліджень і швидкої оцінки рудних матеріалів.

8.7 Контроль промислової безпеки

У виробничих процесах, де попадання сторонніх металевих об'єктів у продукцію чи технологічні лінії є неприпустимим, особливо важливо мати засоби для оперативного локального контролю. Вимоги подібного роду притаманні харчовій, фармацевтичній, електронній і точній машинобудівній галузям, де навіть маленькі металеві частини можуть викликати псування продукції, зупинку обладнання або виникнення небезпечних умов. За таких обставин портативний магнітометричний детектор є дієвим варіантом для швидкого обстеження маленьких об'єктів, інструментів та сировини.

Пристрій може використовуватися для контролю спецодягу працівників перед входом у чисті зони виробництва, що дозволяє виявити випадкові металеві деталі, такі як уламки, кріплення або інструменти. Він також корисний для перевірки інструментів після завершення робіт, надаючи впевненість, що жоден металевий компонент не залишився всередині технологічного устаткування. Магнітометричний метод також підходить для аналізу заповнення контейнерів і тари, де потрібно швидко виявити наявність сторонніх вкладів без розкриття упаковки.

Інша ключова область використання — контролювати відходи та вторинні матеріали, де виявлення металевих домішок допомагає уникнути ушкодження дробарок, сепараторів або пресів. Портативний детектор забезпечує точний аналіз та дозволяє працювати у важкодоступних місцях, де стаціонарні рамки або великі промислові металодетектори є неефективними.

На відміну від звичайних металодетекторів, які вимагають спеціально встановлених рамок, конвеєрів або стаціонарних конструкцій, магнітометричний пристрій є компактним, не вимагає складної

інфраструктури та дає можливість проводити локальний контроль на будь-якому етапі технологічного процесу. Це перетворює його на універсальний засіб для забезпечення чистоти і безпеки виробничого процесу. (рис 8.3).

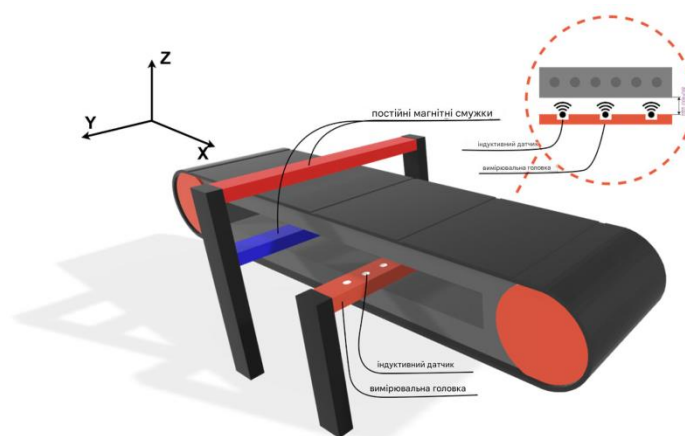


Рисунок 8.3 — Приклад конвеєрної системи контролю з використанням датчиків магнітного поля для виявлення феромагнітних включень

ВИСНОВОК

У магістерській роботі проводиться комплексне дослідження можливостей створення металодетектора, заснованого на аналізі локальних змін магнітного поля, зумовлених наявністю феромагнітних об'єктів, із використанням триосьового датчика QMC5883L, а саме:

1. Детально розглянуто принципи роботи BFO-, VLF- та PI-методів, що дало змогу ідентифікувати ключові відмінності між активними індукційними системами та пасивним магнітометричним підходом. Встановлено, що індукційні металодетектори забезпечують високий рівень універсальності та значну глибину виявлення, однак характеризуються більш складною конструкцією, підвищеним енергоспоживанням і чутливістю до впливу електромагнітних завад. З іншого боку, магнітометричний метод, який базується на реєстрації змін природного магнітного поля Землі, вирізняється енергоефективністю, стійкістю до радіочастотних завад і спрощеною реалізацією, хоча діє виключно для виявлення феромагнітних матеріалів.

2. Розроблено прототип металодетектора на базі датчика QMC5883L та платформи Arduino Nano, після чого проведено експериментальні вимірювання для різних форм і розмірів об'єктів. Вивчено залежність сигналу від відстані та просторового положення об'єкта. Результати експериментів показали гарну узгодженість із теоретичними розрахунками та чисельними моделями, виконаними у CST Studio Suite. Відмінності між теоретичними й експериментальними даними пояснено неоднорідною намагніченістю матеріалів і мікроструктурними особливостями зразків.

3. На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації для підвищення чутливості магнітометричних систем. Зокрема,

запропоновано використовувати сенсори нового покоління з вищою точністю, запроваджувати градієнтометричні конфігурації та вдосконалювати цифрову фільтрацію сигналів. Основними перспективними напрямками використання таких пристроїв визначено неруйнівний контроль, моніторинг механічних конструкцій, пошук закладних елементів (арматури), застосування в робототехніці й аерокосмічних системах. Серед ключових переваг такого підходу виділено пасивність і високу енергоефективність

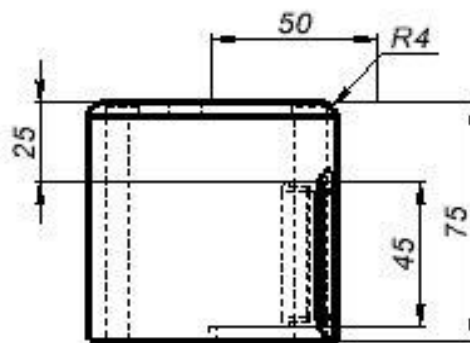
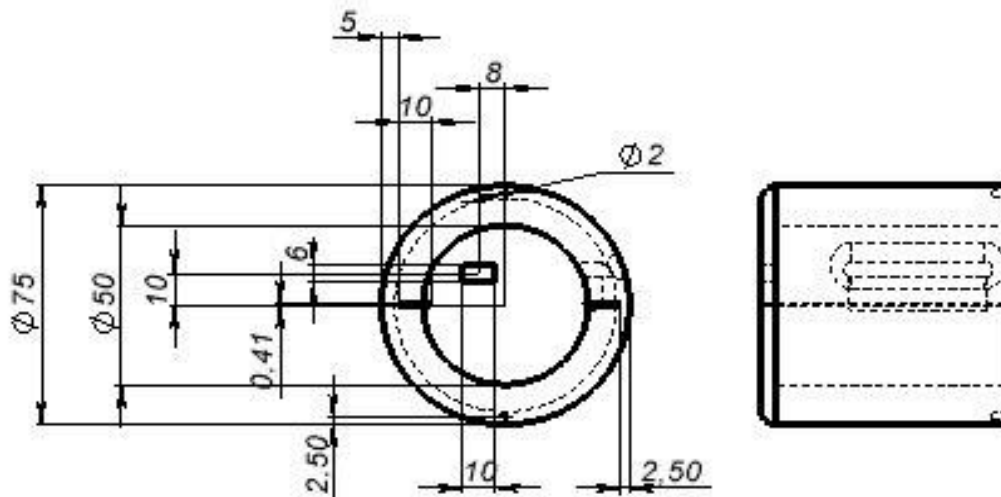
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining [Електронний ресурс]. URL: <https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Publications/PhDBruschiniFinalv2Lowres.pdf> (дата звернення: 10.09.2025).
2. How Do VLF Metal Detectors Work? [Електронний ресурс]. URL: https://www.metaldetector.com/blogs/new_blog/how-do-vlf-metal-detectors-work (дата звернення: 08.09.2025).
3. Types of Metal Detectors: VLF, Pulse Induction and BFO [Електронний ресурс]. URL: <https://gearupgrades.com/metal-detecting/resources/types-of-metal-detectors-vlf-pulse-induction-and-bfo/> (дата звернення: 09.09.2025).
4. Types of Metal Detectors A Technical Guide [Електронний ресурс]. URL: <https://www.techmetalsresearch.com/guide/types-of-metal-detectors/> (дата звернення: 11.09.2025).
5. Understanding Pulse Induction Metal Detectors [Електронний ресурс]. URL: https://www.metaldetector.com/blogs/new_blog/understanding-pulse-induction-metal-detectors (дата звернення: 12.09.2025).
6. Pulse Induction vs VLF Metal Detectors: Which One Is Right for You? [Електронний ресурс]. URL: <https://modernmetaldetectors.com/blogs/news/pulse-induction-vs-vlf-metal-detectors-which-one-is-right-for-you> (дата звернення: 13.09.2025).
7. VLF Detectors vs PI Detectors: Advantages [Електронний ресурс]. URL: <https://megadetection.de/vlf-detectors-vs-pi-detectors-advantages/> (дата звернення: 14.09.2025).
8. BFO Metal Detector [Електронний ресурс]. URL: <https://www.instructables.com/BFO-Metal-Detector/> (дата звернення: 15.09.2025).

9. XMR Sensor Technology Overview [Электронный ресурс]. URL: <https://product.tdk.com/en/techlibrary/developing/bio-sensor/migne-xmr-sensor.html> (дата звернения: 18.09.2025).
10. HMC5883L Compass Module IC. Datasheet [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/321/29133-HMC5883L-Compass-Module-IC-Documentation-v1.-369990.pdf> (дата звернения: 22.09.2025).
11. QMC5883L Datasheet [Электронный ресурс]. URL: <https://www.blogs.uni-mainz.de/fb08-physics-halbach-magnets/files/2025/08/QMC5883L-datasheet.pdf> (дата звернения: 25.09.2025).
12. BFO Theory [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geotech1.com/pages/metdet/info/bfotheory/bfo.pdf> (дата звернения: 15.09.2025).
13. Oscillators [Электронный ресурс]. URL: <https://www.electronicstutorials.ws/oscillator/oscillators.html> (дата звернения: 14.09.2025).
14. The Earth's Magnetic Field (Geomagnetic Field) [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/figure/The-Earths-magnetic-field-the-geomagnetic-field-Notice-that-the-southern-and-northern_fig1_279446083 (дата звернения: 22.11.2025).
15. Magnetic Field Variations and Measurement Errors [Электронный ресурс]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11980988/> (дата звернения: 03.10.2025).
16. Earth's Magnetic Field Educational Resource [Электронный ресурс]. URL: <https://geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html> (дата звернения: 22.11.2025).
17. Finite Element Simulation of Ferromagnetic Objects [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/figure/Finite-element-simulation-of-ferromagnetic-objects-in-free-space-with-a-homogeneous_fig2_3430686 (дата звернения: 15.10.2025).

18. Magnetic Properties of Stainless Steels [Электронный ресурс]. URL: <https://bssa.org.uk/wp-content/uploads/2021/07/SSAS2.81-Magnetic-Properties-of-stainless-steels.pdf> (дата звернення: 20.11.2025).
19. Magnetic Gradient Full Tensor Sensor Array [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/figure/Magnetic-gradient-full-tensor-sensor-array_fig2_338723766 (дата звернення: 05.10.2025).

РІ41мп.731291.001



Розміри для справок
1.H14;h14;±J14/2

Лист №	Лист 1
Стор. №	1
Пер. прим. №	
Име. № докл.	
Г. контр.	
Уте.	
Изм.	
Разр.	
Пров.	
Г. контр.	
И. контр.	
Уте.	

Име. № докл.				
Г. контр.				
И. контр.				
Уте.				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разр.		Лавренко		
Пров.		Мартинюк		
Г. контр.				
И. контр.				
Уте.				

РІ41мп.731291.001			
Корпус	Лит.	Масса	Масштаб
			1:2
Пластик ABS	Лист 1	Листов 1	
	НТУУ "КПІ", РТФ		

ДОДАТОК Б

Програмний код мікроконтролера Arduino

```
#include <Wire.h>

#define QMC5883L_ADDRESS 0x2C //
const float BASELINE = 49.0; // мкТл — середнє значення
магнітного поля Землі для м. Київ

// Виводи світлодіодів
const int leds[] = {2, 3, 4, 5, 6, 7};
const int nLeds = 6;
const int buzzerPin = 9; // Вивід зумера

float scale = 1.0; // мкТл/LSB (визначається під час
калібрування)
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  delay(100);
  // --- Ініціалізація магнітометра QMC5883L ---
  // Встановлення режиму: OSR = 512, RNG = ±8G, ODR = 200 Гц,
безперервний режим
  // (керуючий регістр 0x0A)
  Wire.beginTransmission(QMC5883L_ADDRESS);
  Wire.write(0x0A); // Адреса керуючого регістра
  Wire.write(0x1D); // 0b00011101 → OSR=512, RNG=8G,
ODR=200Hz, continuous
```

```
Wire.endTransmission();
delay(10);

// Скидання регістра стану (рекомендовано виробником)
Wire.beginTransmission(QMC5883L_ADDRESS);
Wire.write(0x09); // Регістр стану / скидання
Wire.write(0x01); // Скидання та очищення
Wire.endTransmission();
delay(10);
// -----

// Налаштування режимів роботи виводів
for (int i = 0; i < nLeds; i++) pinMode(leds[i], OUTPUT);
pinMode(buzzerPin, OUTPUT);
// КАЛІБРУВАННЯ: визначення коефіцієнта масштабування scale
long sum = 0;
int samples = 100;
for (int i = 0; i < samples; i++) {
    int x, y, z;
    readRaw(x, y, z);
    // Обчислення модуля вектора магнітної індукції (сирі дані)
    float mag = sqrt((float)x * x + (float)y * y + (float)z * z);
    sum += mag;
    delay(20);
}
```

```
float avg = (float)sum / samples;

// Захист від ділення на нуль
if (avg == 0) avg = 1.0;

// Коефіцієнт перерахунку з LSB у мкТл
scale = BASELINE / avg;

Serial.print("Середнє сире значення = ");
Serial.println(avg);
Serial.print("Коефіцієнт масштабування scale = ");
Serial.print(scale, 6);
Serial.println(" мкТл/LSB");
Serial.println("Датчик готовий до роботи...");
}

void loop() {
  int x, y, z;
  readRaw(x, y, z);

  // Обчислення модуля вектора магнітної індукції
  float magRaw = sqrt((float)x * x + (float)y * y + (float)z * z);
  float magUT = magRaw * scale;

  // Відхилення від базового рівня геомагнітного поля
  float diff = fabs(magUT - BASELINE);

  // Визначення рівня індикації
```

```

int level = 0;
if (diff <= 5) level = 1;
else if (diff <= 10) level = 2;
else if (diff <= 15) level = 3;
else if (diff <= 20) level = 4;
else if (diff <= 25) level = 5;
else if (diff > 25) level = 6;

// Виведення даних у послідовний порт
Serial.print("X="); Serial.print(x);
Serial.print(" Y="); Serial.print(y);
Serial.print(" Z="); Serial.print(z);
Serial.print(" | Поле = "); Serial.print(magUT, 2);
Serial.print(" мкТл | Δ="); Serial.print(diff, 2);
Serial.print(" мкТл | Рівень="); Serial.println(level);

// Світлодіодна індикація рівня сигналу
for (int i = 0; i < nLeds; i++) {
    if (i < level) digitalWrite(leds[i], HIGH);
    else digitalWrite(leds[i], LOW);
}

// Звукова індикація (активується з 3-го рівня)
if (level >= 3) {
    int freq = 400 + (int)(diff * 20); // Частота сигналу залежить від
величини відхилення
    tone(buzzerPin, freq);
} else {
    noTone(buzzerPin)

```

```

}

delay(100);
}
// Зчитування сирих даних магнітометра
// (порядок байтів: молодший байт → старший байт)
void readRaw(int &x, int &y, int &z) {
    Wire.beginTransmission(QMC5883L_ADDRESS);
    Wire.write(0x00);          // Початкова адреса регістра даних
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(QMC5883L_ADDRESS, 6);

    if (Wire.available() == 6) {
        int16_t x_l = Wire.read();
        int16_t x_h = Wire.read();
        int16_t y_l = Wire.read();
        int16_t y_h = Wire.read();
        int16_t z_l = Wire.read();
        int16_t z_h = Wire.read();

        x = (int16_t)((x_h << 8) | (x_l & 0xFF));
        y = (int16_t)((y_h << 8) | (y_l & 0xFF));
        z = (int16_t)((z_h << 8) | (z_l & 0xFF));
    } else {
        // У разі помилки зчитування
        x = y = z = 0;
    }
}

```

ДОДАТОК В

Аналітичні розрахунки магнітних параметрів циліндра, труби та профілю

Радіус циліндру: $R_{\text{ц}} = 0,0058 \text{ м}$

Довжина циліндру: $h_{\text{ц}} = 0,13 \text{ м}$

Відстань від датчика до краю циліндру: $l = 0,01 \text{ м}$

Об'єм зразка: $V = \pi \times R_{\text{ц}}^2 \times h_{\text{ц}} = 1,726 \times 10^{-6} \text{ м}^3$

З урахуванням демагнітаційного фактора ефективна сприйнятливність визначається рівнянням для перпендикуляру та паралелі відповідно

$$\chi_{\text{еф/перпен}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{перпен}} \times \chi} = 142,78$$

$$\chi_{\text{еф/парал}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{парал}} \times \chi} = 19,229$$

де N — демагнітаційний коефіцієнт для перпендикуляру та паралелі відповідно: $N_{\text{перпен}} = 0,05$, $N_{\text{парал}} = 0,005$

Обчислення напруженості зовнішнього магнітного поля:

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0} = 39,789 \text{ А/м}$$

Намагніченість матеріалу для перпендикуляру та паралелі відповідно:

$$M_{\text{перпен}} = V \times \chi_{\text{еф/перпен}} \times H_3 = 0,098 \text{ А/м}^2$$

$$M_{\text{парал}} = V \times \chi_{\text{еф/парал}} \times H_3 = 0,013 \text{ А/м}^2$$

Магнітний момент:

$$B_{\text{перпен}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{перпен}}}{\left(l + \frac{h_{\text{ц}}}{2}\right)^3} = 37 \times 10^{-6} \text{ мкТ}$$

$$B_{\text{парал}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{парал}}}{\left(l + \frac{R_{\text{ц}}}{2}\right)^3} = 97,934 \times 10^{-6} \text{ мкТ}$$

Внутрішній діаметр труби: $D_t = 0,0105$ м

Зовнішній діаметр труби: $d_t = 0,0075$ м

Довжина циліндру: $h_t = 0,157$ м

Відстань від датчика до краю циліндру: $l = 0,05$ м

Об'єм зразка: $V = \frac{\pi}{4} \times (D_t^2 + d_t^2) \times h_t = 2,663 \times 10^{-5}$ м³

Магнітна сприйнятливність матеріалу $\chi = \mu_c - 1 = 499$

З урахуванням демагнітаційного фактора ефективна сприйнятливність визначається рівнянням для перпендикуляру та паралелі відповідно

$$\chi_{\text{еф/перпен}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{перпен}} \times \chi} = 163,827$$

$$\chi_{\text{еф/парал}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{парал}} \times \chi} = 47,61$$

де N — демагнітаційний коефіцієнт для перпендикуляру та паралелі відповідно: $N_{\text{перпен}} = 0,0041$, $N_{\text{парал}} = 0,019$

Обчислення напруженості зовнішнього магнітного поля:

$$H_z = \frac{B_z}{\mu_0} = 39,789 \text{ А/м}$$

Намагніченість матеріалу для перпендикуляру та паралелі відповідно:

$$M_{\text{перпен}} = V \times \chi_{\text{еф/перпен}} \times H_z = 0.174 \text{ А/м}^2$$

$$M_{\text{парал}} = V \times \chi_{\text{еф/парал}} \times H_z = 0.05 \text{ А/м}^2$$

Магнітний момент:

$$B_{\text{перпен}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{перпен}}}{\left(l + \frac{h_t}{2}\right)^3} = 16,365 \times 10^{-6} \text{ мкТ}$$

$$B_{\text{парал}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{парал}}}{\left(l + \frac{D_t}{2}\right)^3} = 50 \times 10^{-6} \text{ мкТ}$$

Внутрішній діаметр труби: $D_t = 0,0105$ м

Зовнішній діаметр труби: $d_t = 0,0075$ м

Довжина циліндру: $h_t = 0,157$ м

Відстань від датчика до краю циліндру: $l = 0,01$ м

Об'єм зразка: $V = \frac{\pi}{4} \times (D_t^2 + d_t^2) \times h_t = 2,663 \times 10^{-5}$ м³

Магнітна сприйнятливність матеріалу $\chi = \mu_c - 1 = 499$

З урахуванням демагнітаційного фактора ефективна сприйнятливність визначається рівнянням для перпендикуляру та паралелі відповідно

$$\chi_{\text{еф/перпен}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{перпен}} \times \chi} = 163,827$$

$$\chi_{\text{еф/парал}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{парал}} \times \chi} = 47,61$$

де N — демагнітаційний коефіцієнт для перпендикуляру та паралелі відповідно: $N_{\text{перпен}} = 0,0041$, $N_{\text{парал}} = 0,019$

Обчислення напруженості зовнішнього магнітного поля:

$$H_z = \frac{B_z}{\mu_0} = 39,789 \text{ А/м}$$

Намагніченість матеріалу для перпендикуляру та паралелі відповідно:

$$M_{\text{перпен}} = V \times \chi_{\text{еф/перпен}} \times H_z = 0.174 \text{ А/м}^2$$

$$M_{\text{парал}} = V \times \chi_{\text{еф/парал}} \times H_z = 0.05 \text{ А/м}^2$$

Магнітний момент:

$$B_{\text{перпен}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{перпен}}}{\left(l + \frac{h_t}{2}\right)^3} = 50 \times 10^{-6} \text{ мкТ}$$

$$B_{\text{парал}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{парал}}}{\left(l + \frac{D_t}{2}\right)^3} = 117 \times 10^{-6} \text{ мкТ}$$

Сторона ззовні профілю: $a = 0,0025$ м

Сторона всередині профілю $b = 0,0019$

Довжина профілю: $h_{\text{п}} = 0,228$ м

Відстань від датчика до краю циліндру: $l = 0,05$ м

Об'єм зразка: $V = (a^2 - b^2) \times h_{\text{п}} = 6 \times 10^{-5}$ м³

Магнітна сприйнятливність матеріалу $\chi = \mu_c - 1 = 499$

З урахуванням демагнітаційного фактора ефективна сприйнятливність визначається рівнянням для перпендикуляру та паралелі відповідно

$$\chi_{\text{еф/перпен}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{перпен}} \times \chi} = 249.75$$

$$\chi_{\text{еф/парал}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{парал}} \times \chi} = 13$$

де N — демагнітаційний коефіцієнт для перпендикуляру та паралелі відповідно: $N_{\text{перпен}} = 0,002$, $N_{\text{парал}} = 0,075$

Обчислення напруженості зовнішнього магнітного поля:

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0} = 39,789 \text{ А/м}$$

Намагніченість матеріалу для перпендикуляру та паралелі відповідно:

$$M_{\text{перпен}} = V \times \chi_{\text{еф/перпен}} \times H_3 = 0.6 \text{ А/м}^2$$

$$M_{\text{парал}} = V \times \chi_{\text{еф/парал}} \times H_3 = 0.031 \text{ А/м}^2$$

Магнітний момент:

$$B_{\text{перпен}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{перпен}}}{\left(l + \frac{h_{\text{п}}}{2}\right)^3} = 27 \times 10^{-6} \text{ мкТ}$$

$$B_{\text{парал}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{парал}}}{\left(l + \frac{a}{2}\right)^3} = 25.5 \times 10^{-6} \text{ мкТ}$$

Сторона ззовні профілю: $a = 0,0025$ м

Сторона всередині профілю $b = 0,0019$

Довжина профілю: $h_{\text{п}} = 0,228$ м

Відстань від датчика до краю циліндру: $l = 0,01$ м

Об'єм зразка: $V = (a^2 - b^2) \times h_{\text{п}} = 6 \times 10^{-5}$ м³

Магнітна сприйнятливність матеріалу $\chi = \mu_{\text{с}} - 1 = 499$

З урахуванням демагнітаційного фактора ефективна сприйнятливність визначається рівнянням для перпендикуляру та паралелі відповідно

$$\chi_{\text{еф/перпен}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{перпен}} \times \chi} = 249.75$$

$$\chi_{\text{еф/парал}} = \frac{\chi}{1 + N_{\text{парал}} \times \chi} = 13$$

де N — демагнітаційний коефіцієнт для перпендикуляру та паралелі відповідно: $N_{\text{перпен}} = 0,002$, $N_{\text{парал}} = 0,075$

Обчислення напруженості зовнішнього магнітного поля:

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0} = 39,789 \text{ А/м}$$

Намагніченість матеріалу для перпендикуляру та паралелі відповідно:

$$M_{\text{перпен}} = V \times \chi_{\text{еф/перпен}} \times H_3 = 0.6 \text{ А/м}^2$$

$$M_{\text{парал}} = V \times \chi_{\text{еф/парал}} \times H_3 = 0.031 \text{ А/м}^2$$

Магнітний момент:

$$B_{\text{перпен}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{перпен}}}{\left(l + \frac{h_{\text{п}}}{2}\right)^3} = 62.744 \times 10^{-6} \text{ мкТ}$$

$$B_{\text{парал}} = \frac{\mu_0}{4 \times \pi} \times \frac{2 \times M_{\text{парал}}}{\left(l + \frac{a}{2}\right)^3} = 54.6 \times 10^{-6} \text{ мкТ}$$