

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

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

« ____ » _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології та системи»**

спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

на тему: «Система локалізації магнітних аномалій»

Виконав :

студент IV курсу, групи ВА-71

Лікаренко Володимир Янович _____

Керівник:

Ст. викладач

Козир Олег Васильович _____

Консультант з нормоконтролю:

Доцент, к.т.н., доцент

Богомазов Сергій Анатолійович _____

Рецензент:

Професор, д.т.н., професор

Маєвський Станіслав Михайлович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2021 року

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

Факультет (інститут) приладобудівний факультет
(повна назва)

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітньо-професійна програма
«Інформаційні вимірювальні технології та системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Володимир ЄРЕМЕНКО
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Лікаренку Володимиру Яновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Система локалізації магнітних аномалій

керівник проєкту (роботи) Козир Олег Васильович, старший викладач,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. №__

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) 1. Вимірювальні величини: складові вектору магнітної індукції. 2. Діапазон вимірювання: 0...0.008 Тл, 2.Точність/Похибка вимірювання: похибка вимірювання проекцій вектору магнітної індукції: < 1 %

4. Зміст (дипломної роботи) розрахунково-пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) ТЗ. Вступ. Огляд існуючих технічних рішень. Розробка структурної, функціональної та принципової схем.

5. Перелік (ілюстративного) графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів тощо) Схема структурна. Схема функціональна. Схема принципова.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)*

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

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапу виконання дипломного проєкту	Строк виконання етапів проєкту
1.	Дослідження проблемного об'єкту	25.02.2021
2.	Розробка та затвердження технічного завдання	05.03.2021
3.	Розробка структури виробу	20.03.2021
4.	Розробка функціональної схеми виробу	10.04.2021
5.	Розробка схем принципів окремих модулів	20.04.2021
6.	Розрахунки показників якості виробу	10.05.2021
7.	Висновки	20.05.2021
8.	Оформлення дипломного проєкту	25.05.2021

Студент

(підпис)

Лікаренко В.Я.

(ініціали, прізвище)

Керівник проєкту

(підпис)

Козир О.В.

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту (роботи)

АНОТАЦІЯ

У дипломному проекті розглянуті існуючі аналогічні технічні рішення розглянуті проблеми визначення місцезнаходження магнітних аномалій та алгоритм за яким можна провести локалізацію. Данна система вимірює значення проекцій вектору магнітної індукції. Для дипломного проекту були обрані сучасні недорогі датчики, мікроконтролери, радіоелементи, що мають мінімальну похибку, і забезпечують високу ефективність даної системи.

В ході роботи було спроектовано структурну, функціональну та принципову схеми системи, проведено аналіз та розрахунок похибок.

ANNOTATION

Existing similar technical solutions are considered in the diploma project along with problems of locating magnetic anomalies and the algorithm by which localization can be performed. This system measures the values of the projections of the magnetic induction vector. There were chosen modern inexpensive sensors, microcontrollers, radio elements for the diploma project. They provide high efficiency of this system and have the minimum error.

In the course of the work, the system's structural, functional, and basic scheme was designed, and the analysis and calculation of errors were carried out.

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

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ІВТ

_____ проф. Володимир ЄРЕМЕНКО

" ____ " _____ 2021 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт

«Система локалізації магнітних аномалій»

ВА71.060004.001 ТЗ

УЗГОДЖЕНО:

Керівник дипломного проєкту

Ст. Викладач

(Посада)

Козир Олег Васильович

(Прізвище І.ПБ.)

" ____ " _____ 2021 р.

Дипломник:

Ст. гр. ВА-71

Лікаренко Володимир Янович

(Прізвище І.ПБ.)

" ____ " _____ 2021р.

Залікова книжка _____

Київ 2021

1 Найменування та область використання

1.1 ІВС призначена для локалізації магнітних аномалій.

1.2 Область використання – геодезія.

2 Мета і технічне обґрунтування розробки

2.1 Мета розробки – розробка ІВС, яка дозволить визначити місце-знаходження корисних копалин.

3 Джерела розробки

3.1 Основою для розробки приладу є завдання до дипломного проекту, видане кафедрою ІВТ студенту 4 курсу групи ВА-71 *Лікаренку Володимир*у Яновичу є:

3.2 Наявні алгоритми локалізації магнітних аномалій.

3.3 Датчики магнітного поля та інші радіокомпоненти .

4 Технічні вимоги

4.1 Система повинна складатися з:

- Шести датчиків, які вимірюють складові вектора магнітної індукції
- Мікроконтролеру
- Графічного дисплею

4.1.1 Технічні та метрологічні характеристики

- Вимірювання магнітного поля в діапазоні $0 \dots \pm 0.008$ Тл.
- Похибка вимірювання – 0.35%.

4.2 Вимоги до кліматичного виконання

Вимірювальний пристрій повинен зберігати свої робочі характеристики при впливі кліматичних факторів відповідно до ГОСТ 15150-69 – кліматичному виконанню УХЛ 2.

Кліматичні фактори, що впливають на роботу приладу, наведені нижче.

Таблиця 1 – Кліматичні умови для робочих умов

Кліматичний фактор	Значення
	Нормальні умови
Робоча температура, °C	-60 нижня межа +60 верхня межа
Атмосферний тиск, кПа	80 – 106,7
Максимальна відносна вологість, % (при 25 °C)	85

4.2.1 Вимоги до захисту від впливу навколишнього середовища

Система має бути тепло-, холодостійкою під час транспортування та зберігати функціонування після впливу транспортування.

5. Етапи розробки

Етапи розробки і терміни виконання наведені у таблиці.

Таблиця 5.1- Етапи розробки і терміни виконання

№ з/п	Назва етапу виконання курсового проекту	Строк виконання етапів проекту
1	Дослідження проблемного об'єкту	25.02.2021
2	Розробка та затвердження технічного завдання	05.03.2021
3	Розробка структури виробу	20.03.2021
4	Розробка функціональної схеми виробу	10.04.2021
5	Розробка схем принципів окремих модулів	20.04.2021
6	Розрахунки показників якості виробу	10.05.2021
7	Висновки	20.05.2021
8	Оформлення дипломного проекту	25.05.2021

1 № рядка	Формат	Познака			Найменування		Аркуші	№ екз.	Примітки
1					<u>Альбом 1</u>				
2					Анотація українською мовою		1	1	
3					Анотація іноземною мовою		1	1	
4					Завдання на дипломне проектування		2	1	
5	A4	BA71.060004.001 ТП			Відомість технічного проєкту		1	1	
6	A4	BA71.060004.002 ПЗ			Пояснювальна записка		52	1	
7	A4	BA71.060004.001 ТЗ			Технічне завдання		4	1	
8									
9	A4	BA71.060004.003 ПЕЗ			Перелік елементів		1	1	
10									
11									
12					<u>Альбом 2</u>				
13									
14									
15									
16	A1	BA71.060004.001 Е1			Схема електрична структурна		1	1	
17									
18									
19	A1	BA71.060004.002 Е2			Схема електрична функціональна		1	1	
20									
21									
22	A1	BA71.06004.002 Е3			Схема електрична принципова		1	1	
					BA71.060004.001 ТП				
Зм.	Арк.	№ докум		Підпис					
Розроб.		Лікаренко В.Я.			Система локалізації магнітних аномалій Відомість технічного проєкту	Літ.	Аркуш	Аркуші	
Перев.		Козир О.В.				Т	1	1	
Тех.контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. IBТ, гр. ВА-71			
Н.контр.		Богомазов С.А.							
Затвердж.									

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту**

на тему: «Система локалізації магнітних аномалій»

Київ – 2021 року

ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
1 ОГЛЯД ВІДОМИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	14
1.1 Види магнітометрів.....	14
1.1.1 Диференціальні ферозонди	15
1.1.2 Ферозонди з поперечним збудженням	20
1.1.3 Магнітометр з рідинним комутатором.....	21
1.1.4 Індукційний магнітометр	24
1.1.5 Квантовий магнітометр	25
1.2 Огляд та аналіз аналогів на ринку.....	27
1.2.2 Магнітометр SHANS - 34 TS.....	28
1.2.3 Магнітометр тривісний TENMARS TM-192D	30
2 ОСНОВНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПОШУКУ ОБ'ЄКТІВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	33
2.1 Пошук об'єктів у водному середовищі.....	33
2.2 Порівняльний аналіз електромагнітних методів пошуку	33
2.3 Переваги та недоліки методів	35
3 АНАЛІЗ ТА ВИБІР КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ	38
3.1 Магніторезистивні датчики	38
3.1.1 Загальні відомості.....	38
3.1.2 Технічні характеристики	41
3.2 Датчики Холла.....	41
3.2.1 Загальні відомості.....	41
3.2.2 Технічні характеристики	44

					ВА71.060004.001 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	<div>Система локалізації магнітних аномалій</div> <div>Пояснювальна записка</div>				
Розроб.	Лікаренко В.								
Перевір.	Козир О.В.								
Н. контр.	Богомазов С.А.								
Затв.	Єременко В.С.								
					<div>Літ.</div> <div>О</div> <div>Аркуш</div> <div>11</div> <div>Аркушів</div> <div></div>				
					КПІ ім Ігоря Сікорського каф.ІВТ, гр. ВА-71				

3.3 Висновок	45
3.4 Обчислювальний компонент	46
4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ.....	47
4.1 Схема електрична структурна розроблюваної системи.....	47
4.2 Опис структурної схеми	48
5 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ	49
5.1 Схема електрична функціональна розроблюваної системи	49
5.2 Опис функціональної схеми	50
6. РОЗРОБКА СХЕМИ ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ	51
6.1 Блок живлення	52
6.2 Блок індикації, керування та обробки даних	52
6.3 Блок датчиків	52
7. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ	53
7.1 Опис алгоритму Левенберга Марквардта	53
7.2 Процедура локалізації.....	56
8. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК СИСТЕМИ	60
8.1 Похибка датчика магнітного поля НМС5833L від нелінійності	60
8.2 Статична похибка датчика магнітного поля НМС5833L.....	60
8.2 Похибка датчика магнітного поля НМС5833L від гістерезису	61
9 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	62
ВИСНОВОК.....	64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	65

ВСТУП

Цей проект виконувався на основі технічного завдання виданого кафедрою інформаційно – вимірювальних технологій НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» для дипломного проектування. Дипломний проект присвячений розробці системи локалізації магнітних аномалій.

Трубопроводи, підводні човни, уламки причальних конструкцій та військової техніки, що знаходяться під водою, в глинистих і піщаних відкладеннях, виконані переважно з феромагнітних матеріалів. Феромагнітний об'єкт змінює природне магнітне поле Землі (МПЗ), створюючи його аномалію. Таким чином, вимірювання зміни МПЗ дозволяє виявити об'єкт під водою, або в інших середовищах.

Як засоби пошуку використовуються магнітометри. На практиці їх використовують для пошуку металу, в тому числі і скарбів в польових умовах. Георадари, не кажучи вже про більш прості прилади електророзвідки, не можуть з ними зрівнитись. Все це через те, що сигнал який випускають ті ж самі георадари гасне на три порядки швидше. Саме тому магнітометри і використовують в пошуку тих елементів які були описані вище, а саме:

- затонулі кораблі і підводні човни
- бойова техніка на полях минулих битв
- старовинні залізні предмети та ін.

Магнітометр шукає не тільки метал. Він може визначати залишкові частини стін та фундаментів, інші частини будівель. Глина, цегла, камінь також мають намагніченість, хоча вона і менша, ніж у сталі. Також, перешкод для магнітного сканування немає. Воно ігнорує ґрунт і рослинність, твердий камінь і пухкий лід, воду і сторонні предмети.

Метою цього дипломного проекту є :

- Огляд існуючих рішень
- Огляд існуючих алгоритмів локалізації магнітних аномалій
- Розробка схем системи на базі мікроконтролера

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						13
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ВІДОМИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

1.1 Види магнітометрів

Магнітометричні перетворювачі відносяться до пасивних. Вони працюють на основі явища виникнення електрорушійної сили (ЕРС) електромагнітної індукції в контурі, пронизуємої потоком магнітної індукції. Джерелом енергії такого перетворювача є електромагнітне поле. Це забезпечує неможливість вибуху вибухонебезпечних предметів ініціюючими фізичними полями при активному зондуванні, що достатньо необхідно.

В основі роботи магнітометрів лежать такі фізичні закони і явища, як закон електромагнітної індукції Фарадея, ефект Холла, Гаусса, Джозефсона та ін.

Виміряти мінімальні зміни магнітного поля Землі дозволяють наступні види засобів вимірювальної техніки (далі - ЗВТ):

- 1) квантові і надпровідні магнітометри;
- 2) магніто-оптичні перетворювачі;
- 3) датчики Холла;
- 4) протонні магнітометри; 5) ферозондові магнітометри (далі - ФМ).

Класифікація магнітометрів зображена на рисунку 1.1



Рисунок 1.1 — Класифікація магнітометрів за ґрунтовними фізичними ефектами

1.1.1 Диференціальні ферозонди

В даний час найбільш широко використовуються ферозондові прилади. Вони характеризуються високою чутливістю і точністю, а також можливістю безпосереднього вимірювання складових вектора магнітного поля, що забезпечує отримання повної інформації про структуру поля і його джерела. ФМ мають чутливий елемент, далі (ЧЕ), що представляє собою котушку індуктивності з феромагнітним осердям, магнітні властивості якого змінюються під дією вимірюваного або допоміжного МП [1].

Таким чином, параметром, на який здійснюється вплив, є магнітна проникність осердя μ . Ферозондові перетворювачі застосовуються в вимірах стаціонарних або повільно змінюючихся МП.

В основі роботи феррозонда лежить принцип модуляції вимірюваного магнітного потоку з виділенням парно-гармонійного вимірювального сигналу. Перетворювач включає один або два феромагнітних осердя, обмотки збудження і сигнальної обмотки. Функціонування ферозонда полягає у взаємодії в обсязі осердів постійного вимірюваного МП і змінного допоміжного МП, яке з'являється під впливом струму, що тече в обмотці збудження. В сигнальній обмотці формується ЕРС, яка характеризує вимірюване МП [1].

ЕРС сигнальної обмотки розраховується за формулою:

$$e_k = -w_{\text{и}} \frac{d\Phi}{dt} = -H_0 \cdot S \cdot \mu_o \cdot w_{\text{и}} \frac{d\mu_d}{dt}$$

Де:

e_k – ЕРС в сигнальній обмотці, В,

$w_{\text{и}}$ – число витків вимірювальної обмотки,

H_0 – проекція напруженості вимірюваного поля на магнітну вісь феррозонда, А / м,

Φ – магнітний потік в осерді, Вб, S – площа поперечного перерізу осердя, м,

μ_d – диференціальна магнітна проникність осердя.

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						15
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Допоміжне поле викликає періодичні зміни μ_d , що забезпечує чутливість феррозонда до постійної H_0 і її порівняно повільних варіацій. Феррозонди характеризуються наявністю магнітної осі. У таких перетворювачах вихідний сигнал пов'язаний з проекцією вектора магнітної індукції на магнітну вісь.

Отже, вихідний сигнал є не тільки функцією вектора магнітної індукції, а й функцією просторового розташування перетворювача. Змінюючи просторове положення ФМ при повороті на рівні кути в заданій площині, можна отримати залежність значення і напрямку вектора магнітної індукції від кута повороту у вигляді діаграми спрямованості, представленої на рисунку 1.2.

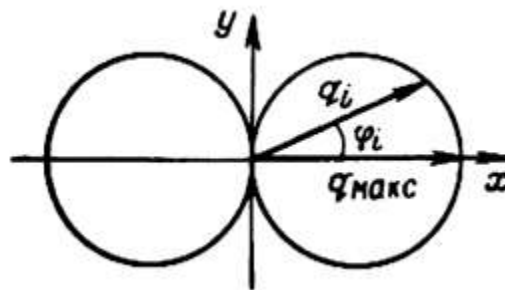


Рисунок 1.2 — Діаграма спрямованості феррозонда

Де:

q_i - i -е значення вихідного сигналу перетворювача, Тл

q_{max} - максимальне вихідне значення перетворювача, Тл

φ_i - i -й кут повороту перетворювача, °

Якщо за початковий напрямок діаграми вибрати вісь x , яка збігається з максимальним позитивним значенням, то вірний вираз:

$$q_i = q_{max} \cdot \cos \varphi_i = S \cdot B \cdot \cos(B_{\Omega}, i_m^0)$$

$$q_i = q_{max}$$

Де:

S — чутливість перетворювача.

B_{Ω} — напрямок вектора в площині кута повороту, Тл,

i_m^0 — магнітна вісь перетворювача

Таким чином, при збігу магнітної осі феррозонда з напрямком силових ліній зовнішнього МП діаграма спрямованості має максимальне значення ($q_i = q_{max}$), вектори B_{Ω} і i_m^0 збігаються і модуль вектора B_{Ω} обчислюється за формулою:

$$B_{\Omega} = \frac{q_{max}}{S}$$

Існує кілька класифікацій феррозондів: по режиму роботи, принципу дії, конструкції, способу накладення допоміжного поля. Феррозонди можуть працювати в двох режимах.

Перший режим характеризується наявністю слабого змінного і сильного постійного струмів. Постійний струм створює в осердях сильне МП, спрямоване в протилежні сторони. Вимірюється МП алгебраїчно підсумовується з постійним МП, зменшує μ_d в одному з осердь і збільшує в іншому. Через це баланс індукції порушується і у вторинній обмотці з'являється ЕРС, пропорційна індукції вимірюваного поля [1].

Перший режим роботи забезпечує малу споживану потужність по змінному струмі і відрізняється нелінійністю функції перетворення.

У другому режимі роботи по ланцюгу збудження феррозонда протікає тільки змінний струм. Створюване струмом змінне МП періодично доводить осердя до стану магнітного насичення. В той же час вимірюване поле настільки мале, що воно не впливає на перемагнічування осердів. Другий режим має ряд переваг перед першим. По-перше, у другому режимі використовується парногармонійний спектр сигналу, що дозволяє поліпшити співвідношення сигнал / перешкода. По-друге, забезпечується стабільність нуля

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						17
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ферозонда і більший динамічний діапазон. Також у другому режимі досягається більш висока лінійність функції перетворення [1].

Феррозонди з'явилися в 30-х роках ХХ століття. Перший феррозонд був винайдений вченими Х. Ашенбреннер і Г. Губо і представляв собою кільцеве осердя з первинною обмоткою і розташованого поверх них спеціального каркаса з вторинною обмоткою, як показано на рисунку 1.3.

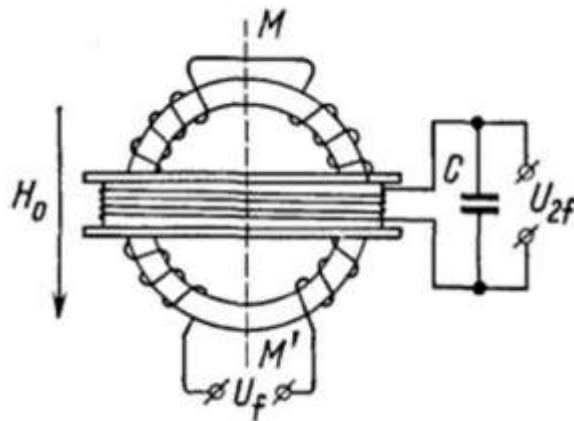


Рисунок 1.3 — Феррозонд Х. Ашенбреннер і Г. Губо

На первинну обмотку подавався струм частоти 500 Гц. ЕРС зі вторинної обмотки мала подвоєну частоту і амплітуду, пропорційну вимірювального компонентного поля, спрямованої уздовж вертикалі ММ.

Пізніше Ф. Ферстер замінив кільцеве осердя на два стержневих. На їх основі вчений створив прилад для випробувань магнітних матеріалів і градіометр.

Приблизно в той же час П.А. Халілеєв розробив стрижневий феррозонд з одним осердям і обмоткою. Цей прилад активно використовувався в магніторозвідці.

Також дослідження і аналіз теоретичних основ в області феррозондових приладів були проведені М. Гаррісоном, Р. Фальдкеллером, В.К. Аркадьєва, М.А. Розенблат, С.Ш. Долгінова, Р.І. Янусом, Л.Х. Фрідманом, В.І. Дрожжина, М.М. Шуміловським, Б.І. Блажкевич, В.Н. Пономарьовим та ін. В 70-х роках ХХ століття

Ю.В. Афанасьєв в своїх роботах докладно описав типи конструкцій і матеріалів феррозондів, їх характеристики [1].

Запропонована Ф. Ферстером конструкція двухстержневого диференціального феррозонда (далі - ДФ) отримала широке поширення і продовжує використовуватися в даний час. схема ДФ приведена на рисунку 1.4.

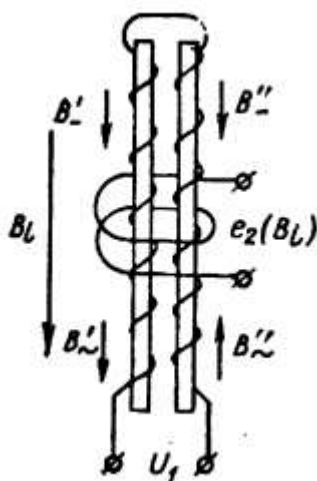


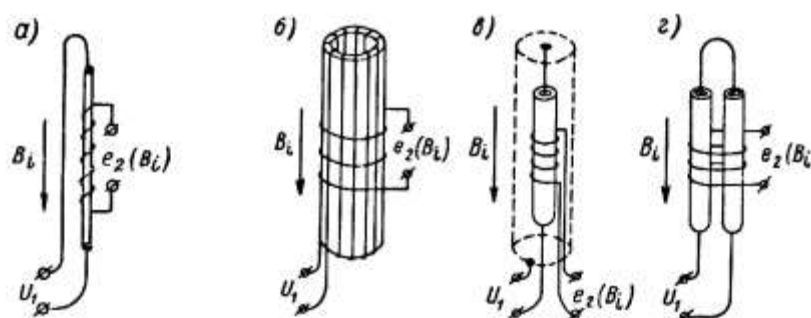
Рисунок 1.4 — Схема диференціального феррозонда

ДФ - це два ферромагнітних стержня з первинними обмотками, включеними послідовно-зустрічно, і загальна вторинна обмотка. При відсутності вимірюваного поля зустрічне включення обмоток збудження забезпечує баланс між потоками в осердях, і, відповідно, рівність нулю ЕРС, що виникає в сигнальній обмотці. Якщо вимірюване поле присутнє, то у вторинній обмотці з'являється ЕРС, пропорційна поздовжньої компоненті зовнішнього поля. ДФ відноситься до феррозондів з поздовжнім збудженням [1].

Матеріалом осеря є залізо-нікелеві сплави, які характеризуються найбільшим значенням магнітної проникності і малим значенням коерцитивної сили H_c . Найвдачнішими є сплави 80НХС, 79НМ, 79НМ-9. Ці сплави дозволяють виготовляти осердя з великої номенклатурою геометричних форм, мають непогану температурну стабільність і достатньо високий питомий електричний опір.

1.1.2 Ферозонди з поперечним збудженням

Існують також ферозонди з поперечним збудженням. Їх конструкції представлені на рисунку 1.5



а) - дротяний, б) - трубчастий, в) - коаксіальний, г) – диференційний

Рисунок 1.5 — Ферозонди з поперечним збудженням

Дротяний ферозонд складається з пермалоевого дротяного осердя, через який протікає змінний струм, і вимірювальної обмотки, нанесеною уздовж стрижня. У модифікаціях дротяного ферозонда використовуються трубчасті сердечники, трубки рівномірно намагнічуються і мають необхідну жорсткість.

ФМ придатні для роботи в слабких магнітних полях в широкому температурному діапазоні і відрізняються високою надійністю, невеликим енергоспоживанням і компактними габаритами. Власні шуми нових ферозондових приладів становлять близько 10^{-12} Тл, що в два рази нижче, ніж у датчиків Холла [1].

Вихідний сигнал ферозонда залежить не тільки від величини зовнішнього магнітного поля, а й від його напрямку щодо магнітної осі ЧЕ. Таким чином, ферозонд використовується як пристрій, який орієнтується в просторі щодо силових ліній поля Землі. Однак для побудови пошукового магнітометра ця властивість розглядається як недолік, оскільки МПЗ на кілька порядків перевершує поля об'єктів вимірювання.

Для усунення впливу орієнтації магнітометра застосовують трикомпонентні ферозондові перетворювачі, які вимірюють модуль сумарного вектора магнітного поля. Однак такі прилади мають ускладнену конструкцію, що

веде до їх подорожчання. Крім того, такі магнітометри мають низьку чутливість, оскільки вимірюють магнітні величини, близькі до МПЗ.

У зв'язку з цим при пошуку прихованих у воді або під землею ферромагнітних об'єктів застосовується однокомпонентний, вертикально орієнтований феррозонд, в якому компенсація МПЗ в магнітних сердечниках ДФ здійснюється струмом в обмотці компенсації. недоліки такого пристрою складаються в складності експлуатації та виготовлення і нестабільності [1].

1.1.3 Магнітометр з рідинним комутатором

Існує метод пошуку, при якому передбачається, що постійна складова МПЗ в радіусі 10 км на поверхні землі є константою. При реалізації методу для автоматичної установки осі чутливості ФМ у вертикальному положенні, широко застосовуються гравітаційні орієнтатори. Оскільки під час пошуку об'єкта оператор знаходиться в русі, з'являються похибки орієнтації, зумовлені імпульсними і високочастотними механічними перешкодами. Для них демпфірування використовується карданний підвіс, який разом з датчиком поміщений в рідину, що не проводить електричний струм [1].

Для досягнення більш високої точності і стабільності орієнтації феррозонда магнітометр містить рідинний комутатор, що дозволяє збирати вибірку значень вимірюваного магнітного поля тільки при збігу магніточутливої осі феррозонда з вертикальною лінією.

Діаграма спрямованості ФМ в поєднанні з рідинним індикатором вертикалі підвищує точність визначення місця розташування об'єкта, стабільність, швидкодію, а також забезпечує технологічність вимірювального процесу.

Схематичне зображення пристрою представлено на рисунку 1.6.

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						21
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

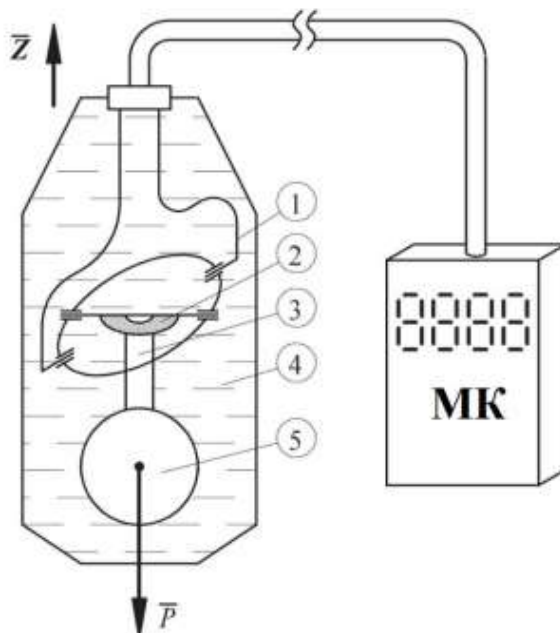


Рисунок 1.6 — Магнітометр з рідинним комутатором

Де:

1 - підвіс гравітаційного орієнтатора

2 - рідинний маятниковий комутатор

3 - ферозондовий датчик

4 - демпфуюча рідина

5 - вантаж маятника

МК - мікроконтролер з електронним перетворювачем сигналів ФМ

P - вектор сили тяжіння

Z - вертикальна складова МПЗ

У ферозондах з кільцевими і об'ємними пермаллоєвими сердечниками, а також для ЧЕ на тонких магнітних плівках характерно кутовий зсув чутливої осі датчика щодо геометричній осі, що веде до підвищення похибки вимірювання. також є похибка в ДФ з паралельними напівелементами через спотворення діаграми спрямованості при плоских переміщеннях навколо власного центру симетрії в неоднорідному МП [1].

Рішення описаних проблем можливо за допомогою співвісного розташування напівелементів стрижневого ДФ. Крім того, можна використовувати безкаркасні соленоїдні обмотки, що дозволяють жорстко

закріпити їх в корпуси магнітометра. описана технологія забезпечує точність суміщення геометричній осі феррозонда і фізичної осі чутливості не гірше 0,5.

Можливе використання як осердя феррозондів плоских магнітних плівок. Такі ЧЕ виготовляють по гібридним технологіям. Прикладом є проект виробництва гібридних ДФ з співвісними напівелементами. Схема гібридного ДФ зображена на рисунку 1.7 [1].

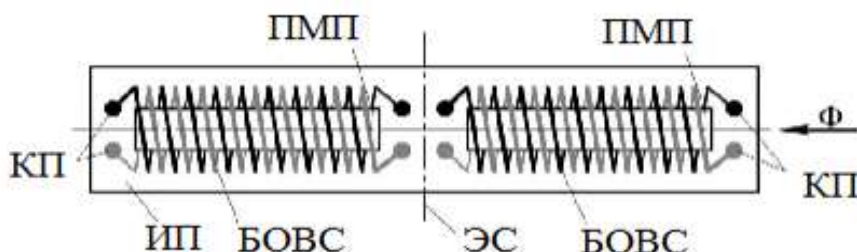


Рисунок 1.7 — Модель гібридного ДФ з плоскою магнітною плівкою

Де:

ПМП - плоска магнітна плівка

ІП - вимірювальна платформа

ЕС - екваторіальний перетин ДФ

Φ - вісь чутливості ДФ

КП - контактні площадки

БОВС - біфілярна обмотка вбудження сигналу

Плоскі індуктивності обмоток ферозонда, виконані по інтегральним технологіям, в порівнянні з індуктивностями котушок мають меншу величину міжвиткової ємності.

Існують ДФ, виконані повністю за інтегральною технологією - MEMS-ферозонди (MEMS flux-gate sensors), виготовлені на основі замкнутого магнітопровода. Приклад такого ферозонда зображений на рисунку 1.8.

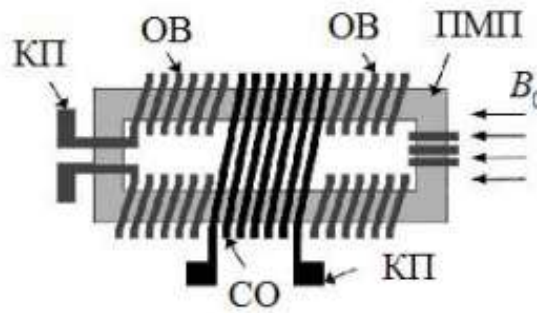


Рисунок 1.8 — Модель інтегрального ДФ з ПМП

Де:

B_0 - силові лінії магнітного поля

ОВ - обмотка збудження С

О - сигнальна обмотка

ПМП - плоска магнітна плівка

КП - контактні площадки

Однак в таких ферозондах плівки магнітопровідників виконуються з магнітом'яких матеріалів. Це збільшує рівень струму збудження сигналом синусоїдальної форми (від 100 до 300 мА), а значення щільності струму стають близькі до граничних. Магнітопоровод займає невелику частину витка вторинної обмотки, що викликає деформацію діаграми спрямованості ДФ.

1.1.4 Індукційний магнітометр

Індукційний магнітометр призначений для вимірювання польових ізотерм намагніченості в полях до 2 Т і в температурному інтервалі від 80 до 370 К. Він характеризується дуже низьким рівнем шуму та широким динамічним діапазоном частот, це робить його придатним для різноманітних застосувань у прикладній геофізиці.

Для вимірювання намагніченості використовується індукційний метод. Вимірювальна частина магнітометра складається з вимірювальної вставки, електронного блоку і керуючої програми і може працювати спільно з

обладнанням установки для вимірювання магнітокалоричного ефекту (керований магніт з джерелом магнітного поля, азотний кріостат, температурний контроллер, два цифрових вольтметра, керуючий комп'ютер з відповідними інтерфейсними і контрольними платами).

Зазвичай прилад дозволяє використовувати будь-яку систему реєстрації даних на відстані до 200 метрів від місця встановлення магнітометра, має водонепроникний міцний корпус і готовий до роботи відразу після підключення.

Рівень шуму і амплітудно-частотна характеристика приладу представлені на рисунку 1.9. На рисунку 1.10 – його зовнішній вигляд [2].

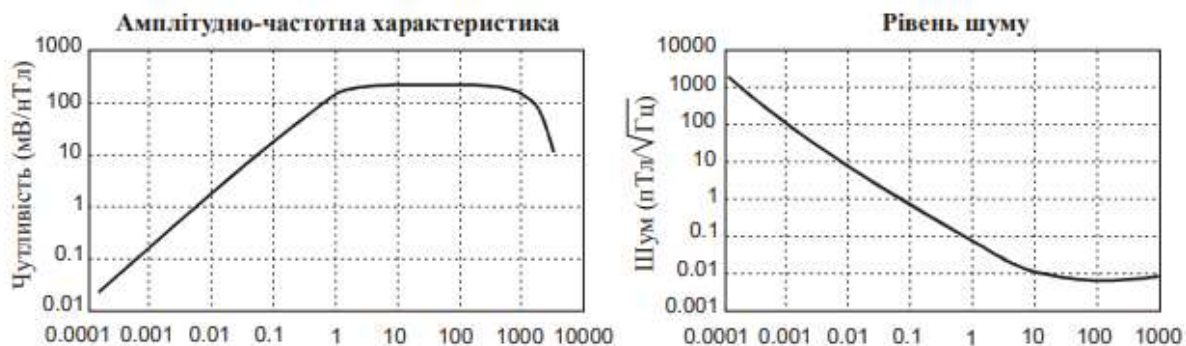


Рисунок 1.9 — Амплітудно-частотна характеристика та рівень шуму.



Рисунок 1.10 — Індукційний магнітометр

1.1.5 Квантовий магнітометр

Прилад, який заснований на вільній прецесії магнітних моментів ядер або електронів в зовнішньому магнітному полі і інших квантових

ефектах(електронному парамагнітному резонансі і ядерному магнітному резонансі).

Для спостереження залежності частоти прецесії магнітних моментів мікрочасток від напруженості потрібно створити макроскопічний магнітний момент ансамблю мікрочасток(ядер чи електронів). Дивлячись на спосіб створення макроскопічного магнітного моменту і методу детектування сигналу розрізняють[2]:

- Протонні магнітометри
- Резонансі магнітометри
- Магнітометри з оптичним накачуванням та ін.

Квантові магнітометри потрібні для вимірювання напруженості слабких магнітних полів в геологорозвідці, магнітохімії (G до $10^{-5} - 10^{-7}$ нТл).

Набагато меншу чутливість ($G \sim 10^{-5}$ Тл) мають квантові магнітометри для вимірювання сильних магнітних полів. Зовнішній вигляд приладу представлено на рисунку 1.11. На рисунку 1.12 – його схема.



Рисунок 1.11 — Оптичний квантовий магнітометр

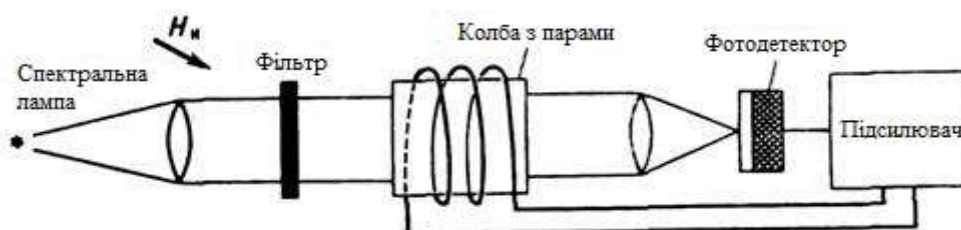


Рисунок 1.12 — Схема оптичного квантового магнітометра

1.2 Огляд та аналіз аналогів на ринку

В даному розділі розглянемо різні моделі магнітометрів і їх характеристики, які можна знайти у продажі.

1.2.1 3-Осьовий магнітометр від Institut Dr. Foerster

Зовнішній вигляд магнітометра представлено на рисунку 1.13.



Рисунок 1.13 — 3 - Осьовий магнітометр

У цього прилада такі характеристики [3]:

- Діапазон вимірювань: 100 μT ;
- Гранична частота: 1 кГц
- Похибка вимірювань: $\pm 0,5\%$ від виміряного значення
- Ортогональність осей датчика: $\leq 0,2^\circ$
- Положення осей датчика щодо корпусу: $\leq 0,25^\circ$
- Шуми: $\leq 35 \text{ пТл} / \sqrt{\text{Гц}}$ при 1 Гц
- Напруга живлення: від +10 до +28 В пост. Струму
- Інтерфейси: RS232, CAN
- Діапазон температур: від -25 до +50 $^\circ\text{C}$
- Розміри: 289 x 40 мм (довжина x діаметр), 270 x 40 x 32 мм (ДхШхВ)
- Маса: 0,6 кг
- Ступінь захисту оболонки: IP 68-Basic IP 66

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						27
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимірювальні датчики цього магнітометра працюють за принципом зондів Фьорстера. При цьому датчики розташовуються таким чином, щоб визначення щільності магнітного потоку виконувалося для всіх 3 осей в одній і тій же точці вимірювання. Магнітометр оснащений цифровим інтерфейсом (RS 232 або CAN) для прямого підключення до ПК.

Проаналізувавши характеристики приладу можна виділити такі переваги:

- Магнітометр з комп'ютерним управлінням
- 3-осьовий магнітометр на зондах Фьорстера
- Аналогові і цифрові інтерфейси
- Одноразове і безперервне вимірювання
- Комплексне програмне забезпечення для збору та аналізу даних
- База даних і інтерфейс для експорту даних

Хоча цей прилад і позиціонує себе як бюджетний, ціна його доволі висока (від 6000 грн).

1.2.2 Магнітометр SHANS - 34 TS

Зовнішній вигляд приладу зображено на рисунку 1.14



Рисунок 1.14 — Магнітометр SHANS - 34 TS

					BA71.060004.001 ПЗ	Арк.
						28
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Цей магнітометр має такі характеристики:

- Принцип дії - ядерна прецесія протонів.
- Тороїдальний датчик з можливістю заміни робочої речовини
- Відображення результатів вимірювань на екрані РКІ, наявність підсвічування екрану.
- Діапазон вимірювання магнітної індукції - 46 000 - 52 000 нТл. Похибка +/- 1 нТл.
- Систематична складова похибки магнітометра не перевищує +/- 2,5 нТл.
- Вбудовано пристрій звукової індикації.
- Час установки робочого режиму - 120 сек (після включення).
- Час одного циклу вимірювання складає 4 с.
- Джерело живлення - акумуляторна батарея 12В.
- Режим поляризації - не більше 1000 мА
- Режим вимірювання - не більше 120 мА

Пошукові характеристики:

- Автомобіль (1 тонна) 10 м.
- Корабель (1000 тонн) 30 м.
- Пістолет 1 м.
- Труба (30 см) 6 м.

Ядерний протонний магнітометр SHANS - 34 TS призначений для високоточного вимірювання абсолютного значення магнітної індукції поля Землі. Магнітометр може виявити в землі техніку, трубопроводи, металобрухт на глибині до 30 метрів [4].

Проаналізуємо характеристики цього магнітометра. Великими плюсом є те, що глибина його виявлення досягає 30 метрів., легко зрозуміти інформацію на інтерфейсі, доволі великий діапазон вимірювання магнітної індукції з маленькою похибкою. Ціна такого магнітометра доволі висока (18 720 грн).

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						29
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2.3 Магнітометр тривісний TENMARS TM-192D

Зовнішній вигляд магнітометра розглянуто на рисунку 1.15.



Рисунок 1.15 — Магнітометр тривісний TENMARS TM-192D

Характеристики даного магнітометра такі [5]:

- Дисплей: 4-розрядний, рідкокристалічний, максимальне число – 9999
- Діапазон: 20/2000 мГ, 2/20/200 мкТл
- Роздільна здатність: 0,1/1 мГ або 0,001/0,01/0,1 мкТл
- Частотний діапазон: 30 Гц - 2000 Гц
- Датчик: тривісний, вимірювання по трьох осях (X, Y, Z)
- Точність: 20 мГ / 2μТ ± (3,0% + 30 одиниць) в діапазоні 50 Гц / 60 Гц, ± (2,5% + 5 одиниць) при 50 Гц / 60 Гц, ± (5,0% + 5 одиниць) при 30...2000 Гц.
- Частота вибірки: 2,5 рази/с
- Батарея: 9 В NEDA 1604, час служби батареї порядку 100 годин, ІЕС 6F22 або JIS 006P
- Умови експлуатації: 5 °С до 40 °С, порядку 80% RH
- Умови зберігання: -10°С до 60°С, порядку 70% RH
- Розміри: 173x80x32 мм.
- Вага: 230 г.

ТМ-192D потрібен для вимірювання параметрів низькочастотних електромагнітних полів в діапазоні від 30 до 2000 Гц. Прилад рекомендований для контролю напруженості електромагнітного поля на робочих місцях і в побуті. Проаналізувавши технічні характеристики приладу більш за все виділяється його компактність та зручність, інші характеристики нічим не виділяються. Ціна теж доволі висока (7560 грн). [5]

1.2.4 Магнітометр Geometrics G-859 із системою GPS.

На рисунку 1.16 зображений магнітометр Geometrics G-859.



Рисунок 1.16 — Магнітометр Geometrics G-859 із системою GPS

Область застосування:

- Отримання карти геомагнітних аномалій про проведенні інженерно-геофізичних робіт. Вивчення підземних об'єктів та комунікацій.

Археологія. Проведення учбових геофізичних наукових практик.[6]

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						31
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Технічні характеристики:

- Принцип дії: Авто-коливна система з оптичною накачкою парами цезію , с розщепленим пучком (нерадіоактивний ізотоп Cs-133).
- Робочий діапазон: від 18000 до 95000 нТ (γ).
- Робочі зони: Для отримання максимальної величини відношення сигнал-шум, продольна вісь датчика повинна бути орієнтована під кутом $45^\circ \pm 30^\circ$ до магнітного поля землі, але робота може бути продовжена і при більшому відхиленні ($45^\circ \pm 35^\circ$). Датчик має функцію автоматичного перемикавання на північну або південну півкулю [3].
- Чутливість: 90% усіх показаних виявляються в межах наступних огинаючих повної амплітуди:
 - 0,03 нТ при тривалості циклу 0,2 с ($SX = 0,113$ нТ)
 - 0,02 нТ при тривалості циклу 0,5 с ($SX = 0,072$ нТ)
 - 0,01 нТ при тривалості циклу 1,0 с ($SX = 0,051$ нТ)
- Полоса частоти інформаційного каналу: $<0,004$ нТ (γ) / $\sqrt{\text{Гц}}$, середньоквадратичне значення.
- Температурний дрейф: $<0,05$ нТ на градус Цельсія.
- Довжина циклу: Може змінюватися в діапазоні від 0,2 до 1 години з шагом 0,1 с, або з допомогою зовнішнього тригера.

В цілому, переглянувши характеристики декількох магнітометрів, можна зробити висновок, що основні параметри приладів доволі різні в залежності від їх виду, основним недоліком являється їх ціна, деякі можуть вимірювати тільки за 2 осями.

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						32
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ОСНОВНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПОШУКУ ОБ'ЄКТІВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.

2.1 Пошук об'єктів у водному середовищі

Об'єкти, що знаходяться під водою протягом тривалого періоду часу, покриваються донними відкладеннями, що ускладнює їх візуальне виявлення. У зв'язку з цим розглянемо електромагнітні методи пошуку, які поділяються на активні і пасивні. Під активним перетворювачем розуміється перетворювач, який впливає на об'єкт пошуку (наприклад, викликає вихрові струми на поверхні об'єкта пошуку), під пасивним - перетворювач, характеристики якого змінюються під впливом магнітного поля (МП) об'єкта.[7]

2.2 Порівняльний аналіз електромагнітних методів пошуку

Найбільш поширеними неконтактними електромагнітними методами пошуку малорозмірних об'єктів на глибинах до 10 м в даний час є магнітометричний, індукційний і радіолокаційний.

Індукційний і радіолокаційний методи є активними. Індукційний метод дозволяє виявити об'єкти, виконані з будь-якого металу (як феромагнітного, так і діамагнітного), а також містять в конструкції металеві елементи. Радіолокаційний метод застосовується для пошуку як металевих так і неметалевих об'єктів.

До пасивних методів відносять магнітометричний метод, призначений для виявлення магнітних аномалій через присутність феромагнітних об'єктів (об'єкти з чавуну, сталі, залізонікелевих сплавів, електронні пристрої в активному стані). Для виявлення діелектричних (з пластмаси, дерева і т.п.) і діамагнітних об'єктів (з дюралюмінію, золота, срібла, бронзи і т.п.) цей метод непридатний [7].

Діаграма методів і типів об'єктів пошуку для них представлена на рисунку 2.1

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						33
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.1 — Методи пошуку і виявлені об'єкти

Глибина виявлення d залежить не тільки від методу пошуку, а й від типу покриття середовища і геометричних параметрів об'єкта. Приклад цієї залежності для металевої сфери радіусом r представлена на рисунку 2.2 [7].

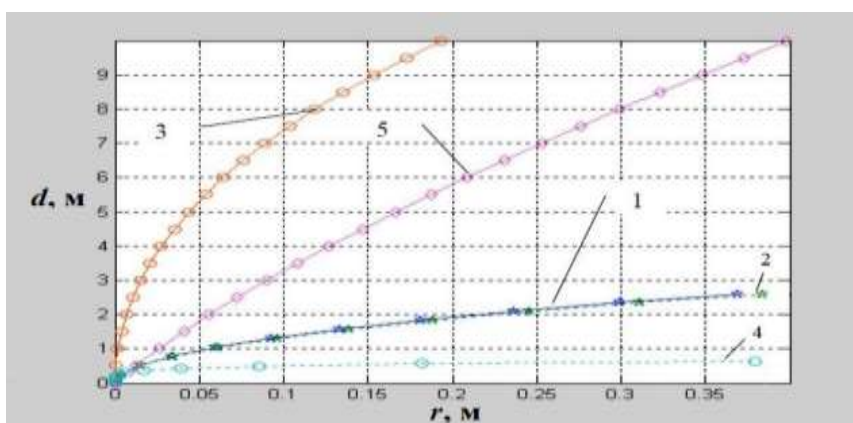


Рисунок 2.2 — Залежність глибини виявлення металевої сфери

Де:

- 1 - індукційний метод, сухий ґрунт;
- 2 - індукційний метод, вологий ґрунт;
- 3 - радіолокаційний метод, сухий ґрунт;
- 4 - радіолокаційний метод, вологий ґрунт;
- 5 - магнітометричний метод, ґрунт будь-якої вологості

З графіків на рисунку 2.2 видно, що найбільша глибина виявлення у вологому ґрунті властива магнітометричному методу.

2.3 Переваги та недоліки методів

Порівняльна характеристика методів представлена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.1 – Магнітометричний метод.

Назва методу	Переваги	Недоліки
Магнітометричний	<ul style="list-style-type: none">- можливість виявлення феромагнітних об'єктів в будь-яких природних середовищах (Глинистих і піщаних ґрунтах, прісної і морської воді і т.д.);- велика глибина пошуку;- висока швидкість пошуку- безпеку пошуку вибухових пристроїв;- невисокі вимоги до кваліфікації оператора	<ul style="list-style-type: none">- обмежене коло виявлених об'єктів;- обмеження використання поблизу залізобетонних споруд (будівель, мостів, і т.д.), електротехнічних установок, в гірській місцевості з металомісткими рудами;- висока вартість приладів та складність в їх виготовленні;- схильність до завад малих об'єктів близько розташованих предметів при пошуку великих об'єктів на великій глибині

Магнітометричні методи використовуються для пошуку:

- Слабомагнітних рудних корисних копалин
- Виявлення зон розломів у породі
- Пошуку метеоритів
- Виділення кільцевих зон вулканів
- Дослідження історичного положення магнітних полюсів

Таблиця 2.1.2 – Індукційний метод.

Назва методу	Переваги	Недоліки
Індукційний	<ul style="list-style-type: none"> - можливість виявлення об'єктів з будь-якого металу; - висока селективність по розмірами шуканого об'єкта: простота «відкидання» дрібних металевих предметів (гільз, осколків боєприпасів і ін.) - при рознесенні генераторної і приймальної магнітних антен; - невисокі вимоги до кваліфікації оператора; - невисока вартість приладів; - малий вплив наявності ґрунту на процес пошуку 	<ul style="list-style-type: none"> - невелика глибина виявлення, співмірна з довжиною бази: відстанню між передавальної і приймальної котушками - схильність до ефірних перешкод (гроза, лінії електропередач і т.п.) - обмеженість частотного діапазону областю постійних і повільно змінюючихся МП

Ферозондові індуктивні магнітометри застосовують для вимірювання магнітного поля Землі та його варіації, при аеромагнітних зйомках та розвідці корисних копалин, у космічних дослідженнях, хірургії, систем контролю якості продукції, в електронних компасах. Також використовуються для детектування ядерних взривів, зв'язку з підводними човнами, металургії, зондуванні земної кори, вивчення взаємодії сонячного вітру з магнітосферою Землі та вільних процесів у космічному просторі, плазмі.

Таблиця 2.1.3 – Радіолокаційний метод.

Назва методу	Переваги	Недоліки
Радіолокаційний	<ul style="list-style-type: none"> - можливість виявлення неоднорідностей в ґрунті: пустот і об'єктів з будь-яких матеріалів (метали, пластмаси ін.); - можливість наближеного визначення глибини залягання об'єкта 	<ul style="list-style-type: none"> - низька селективність об'єктів пошуку, неоднозначність інтерпретації характеру виявленої аномалії; - мала глибина виявлення в ґрунтах з підвищеним загасанням електромагнітних хвиль (вологий суглинок, болото і т.д.); - висока вартість приладів та складність в їх виготовленні; - низька швидкість пошуку, обумовлена великими витратами часу на обробку результатів вимірювань; - високі вимоги до кваліфікації оператора

Висновок:

Порівняльний аналіз основних електромагнітних методів дозволяє зробити наступний висновок: незважаючи на те, що радіолокаційний та індукційний методи є досить перспективними, вони все ж ще поступаються магнітометричному у простоті реалізації та користування. Тому для системи використаємо магнітометричний метод.

3 АНАЛІЗ ТА ВИБІР КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ

В цьому розділі будуть розглянуті та проаналізовані доступні на ринку датчики, які можуть бути використані у даній системі.

3.1 Магніторезистивні датчики

3.1.1 Загальні відомості

Магніторезистивні датчики використовуються там, де потрібна висока чутливість в узькому діапазоні вимірюваної величини. Вони застосовуються в магнітометрії для вирішення різних завдань:

- Визначення кута повороту
- Визначення положення об'єкта щодо магнітного поля землі
- Вимірювання частоти обертання зубчастих коліс та ін.

Принцип роботи магніторезистивних датчиків полягає у зміні напрямку намагніченості внутрішніх складових кристалічної решітки (доменів) пермалоевої плівки. У залежності від кута між вектором струму та вектором намагнічуваності змінюється опір пермалоевої плівки. Під кутом 90° - опір мінімальний, 0° - відповідає максимальному значенню опору.

Датчики дозволяють змінювати найменші слабкі магнітні поля (від 30 мкГ) з подальшим їх перетворенням у вихідну напругу. У конструкції датчика можуть бути об'єднані кілька мостових схем, що мають форму, таким чином, двох - і трьохосьових сенсорів.

До числа переваг магніторезистивних датчиків можна віднести:

- Відсутність залежності від дистанції між магнітом і датчиком;
- Широкий діапазон робочих температур (від -55 до 150°C);
- Датчики зависять лише від напрямлення поля, а не його інтенсивність;

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						38
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- Довгий термін служби, незалежність від магнітного дрейфу.

Магніторезистивні датчики застосовуються для:

- Контролю переміщення об'єктів у робототехніці
- Вимірювання слабких полів (системи навігації, компенсація поля Землі, електронні та цифрові компаси, тощо)
- Вимірювання частоти обертів
- Побудова безконтактних датчиків тока із гальванічною роз'язкою.

HMC5833L

На рисунку 3.1 зображений зовнішній вигляд датчика, його структурна схема відповідно на рисунку 3.2.



Рисунок 3.1 — Плата розширення функцій датчика HMC5833L

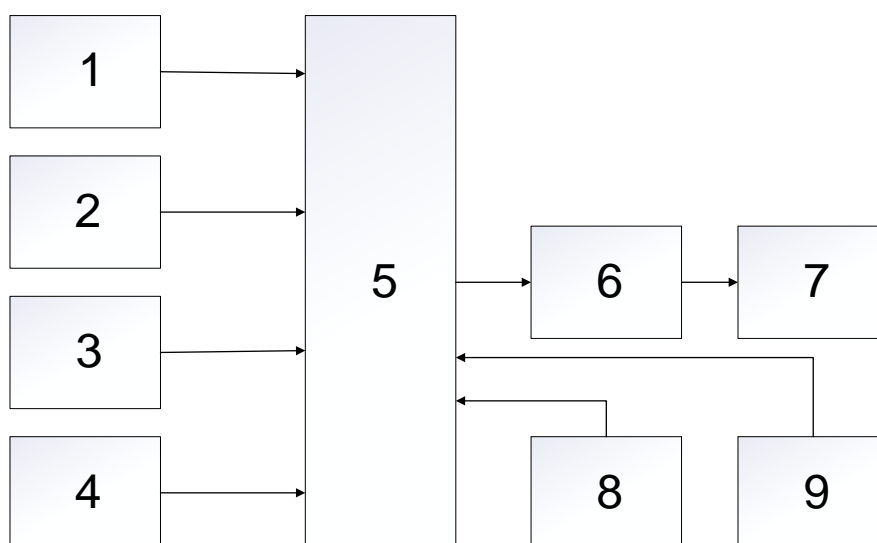


Рисунок 3.2 — Структурна схема датчика HMC5833L

Де:

- 1 – Датчик осі X з диференціальним виходом
- 2 – Датчик осі Y з диференціальним виходом
- 3 – Датчик осі Z з диференціальним виходом
- 4 – Температурний датчик
- 5 - Мультиплексор
- 6 – АЦП
- 7 - Перетворювач коду АЦП на код інтерфейсу I2C
- 8 – Котушка OFFSET
- 9 – Котушка SET/RESET

Модуль 3-х осьового компаса HMC5883L - це магніторезистивний датчик, створений для виявлення слабкого магнітного поля із цифровим інтерфейсом. Модуль компаса перетворює будь-яке магнітне поле на диференціальну вихідну напругу на 3 осях. Ця напруга - вихідне значення цифрового сигналу, яке потім може бути використано для обчислення модуля загального вектору або проєкцій цього вектору на осі X,Y,Z. Модуль може використовуватись з великою кількістю мікроконтролерів з різними вимогами до напруги живлення. [8].

Крім того, на плату датчика додано дві котушки: SET / RESET і OFFSET. Котушка SET / RESET створена для підтримки високої чутливості датчика, котушка OFFSET призначена для компенсації впливу дії паразитних магнітних полів (створених, наприклад, яким-небудь феромагнітним об'єктом або металевими предметами).

Також потрібно відмітити простоту підключення такого датчика, схема підключення до мікроконтролера зображена на рисунку 3.3:

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						40
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

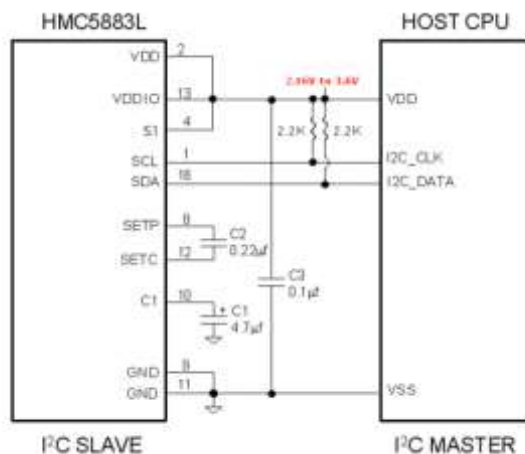


Рисунок 3.3 — Схема підключення датчика до мікроконтролера

3.1.2 Технічні характеристики

В таблиці 3.1 були розглянуті технічні характеристики HMC5833L.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики HMC5833L

Назва характеристики	Мін.	Макс.	Одиниця вимірювання
Струм споживання	2	100	мкА
Діапазон вимірювання	-8	+8	Г
Роздільна здатність	5	5	мГ
Час вимірювання	4	6	мс
Напруга живлення	3.15	3.65	В
Модуль похибки підсилення	-5	+5	%
Робоча температура	-40	+105	*С

3.2 Датчики Холла

3.2.1 Загальні відомості

Магнітні датчики Холла широко поширені в сучасних умовах і застосовуються не тільки в спеціалізованих виробках, але і в звичайній побутовій

техніці. Вони можуть бути встановлені не тільки в електронній апаратурі, але і в засобах пересування (в автомобілі або мотоциклі).

У найпростішому розгляді ефект Холла виглядає наступним чином. Нехай через провідний брусок в слабкому магнітному полі B тече електричний струм під дією напруженості E . Магнітне поле буде відхиляти носії заряду до однієї з граней бруса проти або уздовж електричного поля. Таким чином, сила Лоренца призведе до накопичення позитивного заряду біля однієї грані бруска, і негативною - біля протилежної. Накопичення заряду триватиме до тих пір, поки електричне поле зарядів E_1 не компенсує магнітну складову сили Лоренца.[8]

Датчики Холла застосовуються:

- в приводах дисководів і двигунах вентиляторів комп'ютерної техніки;
- в магнітometri смартфонів в якості фізичної основи роботи електронного компаса;
- в приладах (струмові кліщі, пробники струму) для безконтактного вимірювання сили струму.
- в приводах автоматичного фокусування об'єктива у якості датчика точного фокусування

Датчик TLI493

Зовнішній вигляд датчика зображений на рисунку 3.4, його структурна схема відповідно на рисунку 3.5.



Рисунок 3.4 — TLI493 у корпусі TSOP 6-6-8

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						42
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

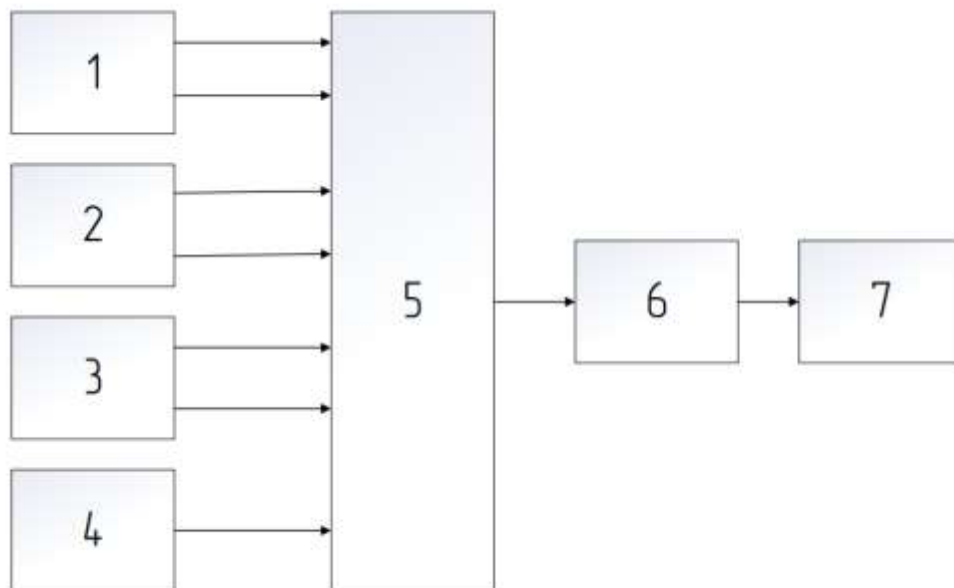


Рисунок 3.5 — Структурна схема TLI 493

На структурній схемі зображені блоки, де:

- 1 – Датчик магнітного поля осі X
- 2 – Датчик магнітного поля осі Y
- 3 – Датчик магнітного поля осі Z
- 4 – Датчик температури для температурної компенсації
- 5 – Аналоговий мультиплексор
- 6 – Аналогово – цифровий перетворювач
- 7 – Перетворювач коду АЦП на код протоколу I2C

Трьохосьовий датчик магнітного поля на основі ефекту Холла TLI493D виробництва компанії Infineon вимірює магнітне поле в трьох напрямках - X, Y, і Z, що дає можливість виявляти тривимірні, лінійні і обертальні рухи. Це робить його ідеальним вибором для широкого кола промислових, автомобільних і споживчих додатків. [9]

Створення подібних датчиків стало можливим завдяки інтеграції вертикальних і горизонтальних датчиків Холла на одному кристалі. Вертикальні

датчики вимірюють X- і Y-складові магнітного поля. Горизонтальні датчики необхідні для вимірювання вертикальної Z-складової.

Впровадження компанією Infineon різних інноваційних рішень, таких, наприклад, як енергозберігаючий генератор, дозволило зменшити струм споживання датчика до декількох мікроампер. Для двонаправленого обміну між датчиком і керуючим мікро контролером використовується цифровий інтерфейс I²C.

Як додаток для застосування датчика TLI493D-A2B6 можна виділити джойстики та різні елементи управління, в тому числі панелі побутових приладів, багатофункціональні кнопки, системи захисту від зломів, а також інші додатки, в яких потрібні точні вимірювання положення і малий струм споживання [9].

3.2.2 Технічні характеристики

Технічні характеристики TLI493 були розглянуті в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики TLI493

Назва характеристики	Мін.	Макс.	Одиниця вимірювання
Струм споживання	10	100	мкА
Діапазон вимірювання	-160	+160	мТл
Розрядність вимірювання темп.	10	10	Біт
Розрядність вимірювання м.п.	12	12	Біт
Час вимірювання	4	6	мс
Напруга живлення	3.1	3.5	В
Модуль похибки підсилення	-5	+5	%
Робоча температура	-40	+105	*С

3.3 Висновок

Були розглянуті найбільш розповсюджені типи датчиків, що використовуються сучасною промисловістю. Проведемо аналіз їх недоліків та переваг який знаходиться більш детально в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Аналіз недоліків та переваг різновидів датчиків

Тип датчику	Тип перетворення	Переваги	Недоліки
Магніторезистивні датчики	«магнітний потік – опір»	Великий динамічний діапазон і достатня лінійність в сильних магнітних полях. Широкий діапазон робочих температур.	Значний струм споживання. Нелінійна характеристика в слабких магнітних полях.
Датчики Холла	«магнітний потік – ЕРС»	Висока чутливість і роздільна здатність. Великий динамічний діапазон при хорошій лінійності вихідної характеристики. Широкий діапазон робочих температур.	Значна величина залишкової напруги і його нестабільність.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що так як об'єкти пошуку не створюють велику магнітну напруженість у середовищі, потрібен датчик з найвужчим діапазоном вимірювання. В нашому випадку цим вимогам більш відповідає датчик на основі магніторезистивного ефекту, НМС5833.

Так як в нашому випадку більш важливою є точність вимірювання, то виберемо магніторезистивний датчик, так як він працює у більшому діапазоні вимірювань, ніж датчик Холла.

3.4 Обчислювальний компонент

Так як система є досить складною, потрібен мікроконтролер з достатньою для зручного користування швидкістю оброблення даних та великим обсягом пам'яті. Провідним виробником мікроконтролерів STMicroelectronics на базі ядра ARM - був випущений мікроконтролер STM32F030, який має наступний вигляд, зображений на рисунку 3.6 і характеристики: [10]



Рисунок 3.6 — Зовнішній вигляд STM32F030

Характеристики мікроконтролера:

Ядро процесора - ARM®32-bit Cortex®-M3

Максимальна частота - 72 МГц

Живлення 2.6 – 3.3 В

Можливість підключення зовнішнього генератора від 4 до 16 МГц

Низька споживаюча потужність

7-канальний контролер DMA (прямий доступ до ПЗП)

Підтримувана периферія: таймери, АЦП, SPI, I2C та USART

Має у своєму складі:

- Три 16-бітні таймера
- Два інтерфейси I2C (SMBus / PMBus)
- Два інтерфейси USART
- Два інтерфейси SPI (18 Мбіт / с)
- CAN-інтерфейс
- Швидкісний інтерфейс USB 2.0

4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

4.1 Схема електрична структурна розроблювальної системи.

Структурна схема системи локалізації магнітних аномалій зображена на рисунку 4.1

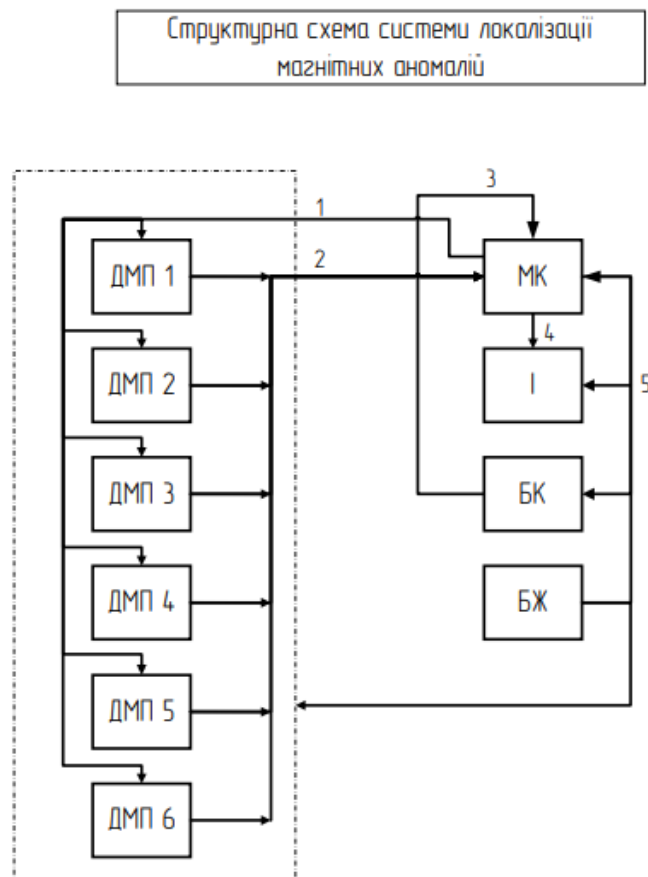


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи

На схемі зображені такі елементи:

ДМП (1 – 6) - Датчики магнітного поля

МК - Мікроконтролер

І - Індикатор

БК - Блок керування

БЖ – Блок живлення

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

4.2 Опис структурної схеми

Загалом структурна схема цифрового локалізатора магнітних аномалій складається з шести 3-х осьових датчиків індукції магнітного поля НМС5833L, мікроконтролера STM32F030, дисплею, акумуляторного блоку живлення та трьох клавіш управління.

Беручи до уваги технічне завдання, структурна схема повинна мати мінімум 6 магнітометрів для можливості розрахунку відстані до магнітної аномалії.

Цифрами позначені лінії зв'язку, вони виконують наступні функції:

- 1 – Керуючий сигнал мікроконтролера, відповідає за вибір опитуваного датчика за його індивідуальним адресом.
- 2 – Лінія відправки результатів вимірювання з датчика на мікроконтролер.
- 3 – Лінія управління блоком керування мікроконтролером.
- 4 – Лінія управління мікроконтролером індикатором
- 5 – Лінія живлення.

5 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ

5.1 Схема електрична функціональна розроблюваної системи

Функціональна схема системи локалізації магнітних аномалій зображена на рисунку 5.1

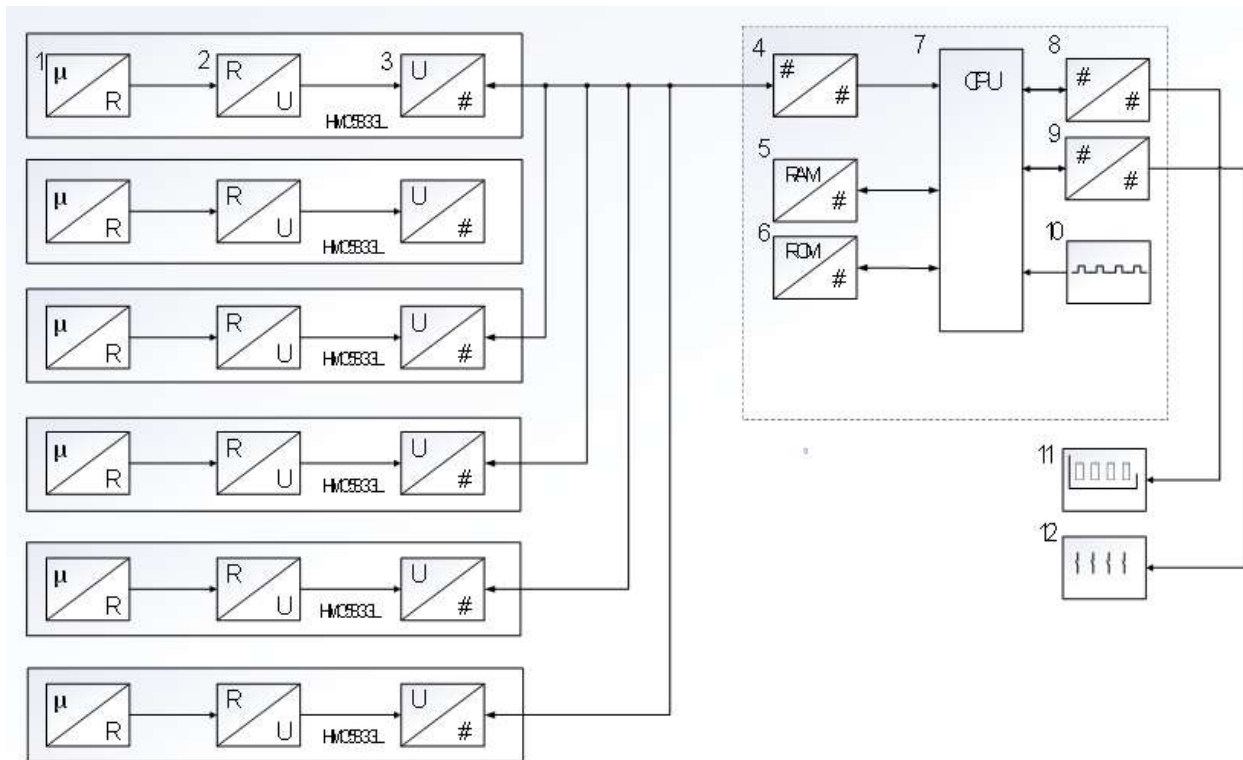


Рисунок 5.1 — Функціональна схема системи

Загалом функційна схема складається з 12 блоків, яка повністю відображає шлях перетворення значення магнітної індукції на оброблюємий мікропроцесором код. Двох - направлена залежність між блоком 3 та 4 встановлена тому, що всі інформаційні виводи датчиків включені паралельно. Щоб система змогла розпізнати до якого датчика вона звертається, датчик повинен мати свій унікальний номер та змогу передати його до мікроконтролера. Це реалізовано у інтерфейсі I2C, який апаратно доступний у обраному мікроконтролері.

5.2 Опис функціональної схеми

Розглянемо роботу кожного датчика окремо, щоб краще розуміти, як вони працюють.

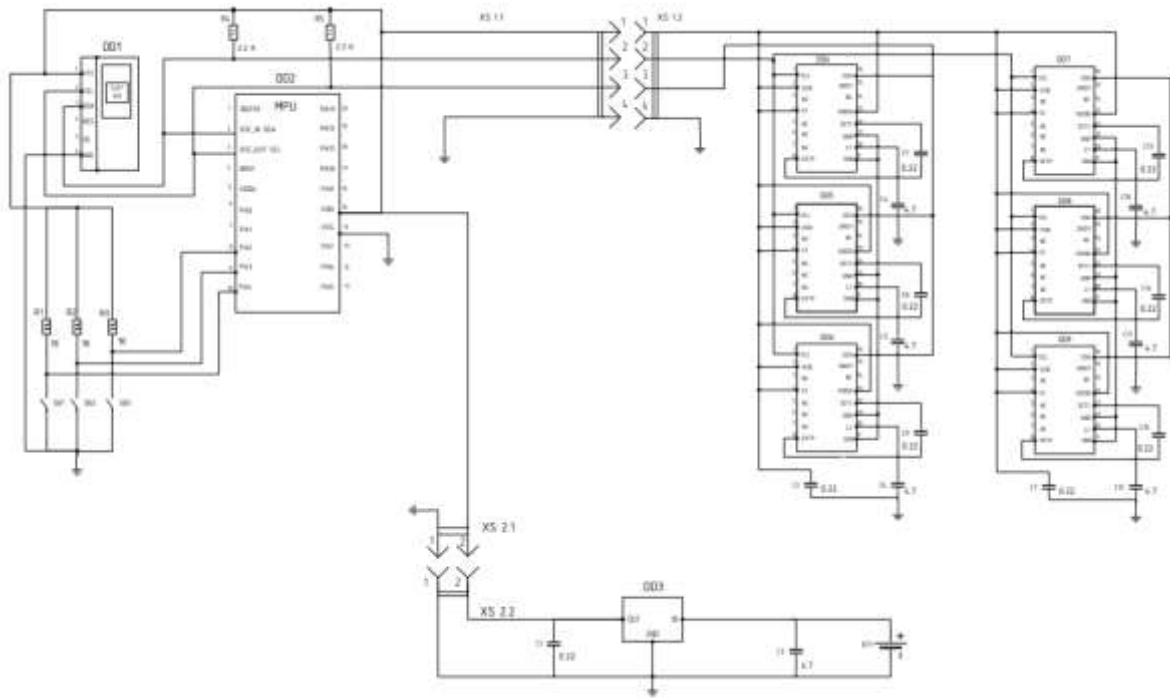
- 1 – Перетворювач Магнітна індукція – Опір
- 2 – Перетворювач Опір - Напруга
- 3 – Перетворювач Напруга – Цифровий код
- 4 – Перетворювач код – код
- 5 – ОЗП
- 6 – ПЗП
- 7 – Мікропроцесор
- 8 - Перетворювач код – код
- 9 – Перетворювач код-код
- 10 – Генератор тактової частоти
- 11 – Дисплей
- 12 – Блок керування (три тактові кнопки).

Перші три блока – блоки функцій, які включає у себе датчик. Так як датчик НМС5833L працює на основі магніторезистивного ефекту, потрібно перетворити опір на електричний сигнал. Це робить Блок 2. Так як датчик цифровий, потрібно перетворити рівень напруги на код. Блок 3 має у своєму складі АЦП та цифровий перетворювач коду АЦП на код інтерфейсу I2C. Блок 4 перетворює код протоколу I2C на код сприймаємий мікропроцесором. Блок 8 та блок 9 утворюють зв'язок між мікропроцесором та дисплеєм, блоком керування відповідно.

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						50
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

6. РОЗРОБКА СХЕМИ ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ

Принципова схема системи локалізації магнітних аномалій зображена на рисунку 6.1.



Розглянемо їх більш детально:

6.1 Блок живлення

- BT1 – акумуляторна батарея, що складається з двох послідовно з'єднаних акумуляторів типу 18650, напругою 8.4 В у повністю зарядженому стані, ємністю 2200 мА/г.
- C1,C2 – керамічні конденсатори поверхневого монтажу типорозміру 0805, ємністю 4.7 мкФ та 2.2 мкФ відповідно.
- DD3 – інтегральний лінійний стабілізатор LF 33, який на своєму виході має стабілізовані 3.3 В. Відрізняється від інших стабілізаторів більшим вихідним струмом та більшим ККД.
- XS 2 – роз'єм двох контактний

6.2 Блок індикації, керування та обробки даних

- R1, R2 ,R3 – плівкові резистори поверхневого монтажу типорозміру 0805, опором 1 кОм, допустимим відхилом в 1%.
- DD1 – графічний дисплей
- R4, R5 – плівкові резистори поверхневого монтажу типорозміру 0805, опором 2.2 кОм, допустимим відхилом в 1%.
- DD2 – мікроконтролер STM32F03
- SB1,SB2,SB3 – звичайні тактові кнопки поверхневого монтажу
- XS 1 – роз'єм чотирьох – контактний

6.3 Блок датчиків

- DD4,DD5,DD6,DD7,DD8,DD9 – мікросхеми датчики HMC 5833L
- C7,C13,C8,C14,C9,C15 - керамічні конденсатори поверхневого монтажу типорозміру 0805, ємністю 0.22 мкФ, з відхилом від номіналу в 1 %..
- C4,C10,C5,C11,C6,C2 - керамічні конденсатори поверхневого монтажу типорозміру 0805, ємністю 4.7 мкФ, з відхилом від номіналу в 1 %.

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						52
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

7. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

В системі буде використаний алгоритм Левенберга Марквардта заснований на двох етапах.

Перший етап забезпечує оцінку траєкторії і моменту цілі, які будуть додатково уточнюватись за допомогою другої ітерації, де невідомим є лише вектор позиції. Перевагою такого алгоритму являється його швидкість, адже протягом декількох секунд можна отримати задовільно результати щодо знаходження цілі, також невеликі цілі можна локалізувати з доволі високою точністю використовуючи вертикальну конфігурацію датчиків, або на рівні землі.

Хотілось би зазначити, що на розрахунки траєкторії не впливали ніякі магнітні перешкоди.

Отже, система потребує точної локалізації феромагнітної маси(на тілі) рухаючись в контрольованому проході, датчики можна виставити на рівні землі або вертикально. Місце, в якому знаходиться ціль включає в себе висоту і бік тіла(лівий або правий) на якому переноситься предмет. Для першої оцінки локалізації буде реалізовано нелінійний алгоритм пошуку найменших квадратів.

7.1 Опис алгоритму Левенберга Марквардта

Одним з найбільш поширених серед градієнтних алгоритмів навчання є алгоритм Левенберга-Марквардта, далі (АЛМ). В основу даного алгоритму покладена ньютонівська стратегія оптимізації, яку можна представити у вигляді:

$$p(w_k) = -[H(w_k)]^{-1} \cdot g(w_k)$$

Тобто, для визначення напрямку $p(w_k)$ необхідно в кожному циклі навчання розраховувати значення градієнта $g(w_k)$ і гессіан $H(w_k)$ у точці відомого останнього значення w_k . Практична реалізація даної стратегії в чистому вигляді

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						53
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

нездійсненна, оскільки вимагає позитивної визначеності гессіан на кожному кроці [11].

Тому в АЛМ Н (w) замінили значенням G (w), яке розраховується на основі інформації з градієнту з урахуванням регуляційного фактора [11].

Для опису цього алгоритму представимо цільову функцію у вигляді:

$$E(w) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n (e_i(w))^2$$

Де:

$$e_i(w) = [y_i(w) - d_i] - \text{помилка навчання моделі}$$

При використанні наступних позначень:

$$e(w) = \begin{bmatrix} e_1(w) \\ e_2(w) \\ \dots \\ e_i(w) \end{bmatrix} \quad J(w) = \begin{bmatrix} \frac{de_1}{dw_1} & \frac{de_1}{dw_2} & \dots & \frac{de_1}{dw_n} \\ \frac{de_2}{dw_1} & \frac{de_2}{dw_2} & \dots & \frac{de_2}{dw_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{de_M}{dw_1} & \frac{de_M}{dw_2} & \dots & \frac{de_M}{dw_n} \end{bmatrix}$$

Вектор градієнту та апроксимована матриця гессіану, яка відповідає цільовий функції E(w), визначаються наступним чином [6]:

$$g(w) = [J(w)]^T \cdot e(w)$$

$$G(w) = [J(w)]^T \cdot J(w) + R(w)$$

Де:

- R(w) – компоненти гессіану.

Сутність підходу Левенберга-Марквардта полягає в апроксимації R(w) за допомогою регуляційного фактору ν , в якому змінна ν , звана параметром

Левенберга-Марквардта, є скалярною величиною, що змінюється в процесі оптимізації. Таким чином, апроксимована матриця гессіану на k -тому кроці алгоритму набуває вигляду:

$$G(w) = [J(w_k)]^T \cdot J(w_k) + v_k$$

На початку процесу навчання, коли фактичне значення w_k ще далеко від шуканого рішення (велике значення вектору похибки e) використовується значення параметра v_k набагато перевищує власне значення матриці $[J(w_k)]^T \cdot J(w_k)$. [11]

В такому випадку гессіан фактично підміняється регуляційного фактором:

$$G(w_k) \cong v_k$$

А напрямок мінімізації вибирається за методом найшвидшого спуску:

$$p_k = - \frac{g(w_k)}{v_k}$$

По мірі зменшення похибки і наближення до шуканого рішення, величина параметра v_k знижується і $[J(w)]^T \cdot J(w)$ починає грати все більш важливу роль.

На ефективність алгоритму впливає грамотний підбір величини v_k .

Занадто велике початкове значення в міру прогресу оптимізації має зменшуватися аж до нуля при досягненні фактичного рішення, близького до шуканого.

Далі наведена методика підбору значення v_k за методикою Д. Марквардта .

Нехай значення цільової функції на k -му та $(k - 1)$ кроку ітерації позначаються відповідно E_k та E_{k-1} , а значення параметра v на цих же кроках - v_k та v_{k-1} .

Коефіцієнт зменшення значення v позначимо r , причому $r > 1$. Відповідно до класичного алгоритму Левенберга-Марквардта значення v змінюється за наступною схемою:

- Якщо $E\left(\frac{v_{k-1}}{r}\right) \leq E_k$, то прийняти $v_k = \frac{v_{k-1}}{r}$
- Якщо $E\left(\frac{v_{k-1}}{r}\right) > E_k$ та $E(v_{k-1}) < E_k$, то прийняти $v_k = v_{k-1}$
- Якщо $E\left(\frac{v_{k-1}}{r}\right) \leq E_k$ та $E(v_{k-1}) > E_k$, то послідовно збільшити m разів значення v для досягнення $E(v_{k-1}, r^m) \leq E_k$, одночасно $v_k = v_{k-1} \cdot r^m$

Така процедура зміни значення v виконується до моменту, в котрому коефіцієнт вірності відображення:

$$q = \frac{E_k - E_{k-1}}{[\Delta w_k]^T \cdot g_k + 0.5 \cdot [\Delta w_k]^T \cdot G_k \cdot \Delta w_k}$$

досягне значення, близького до одиниці. При цьому квадратична апроксимація цільової функції має високу ступінь збігу з істинними значеннями, що свідчить про близькість оптимального рішення.

У такій ситуації регуляційний фактор може бути опущений процес визначення гессіану зводиться до безпосередньої апроксимації першого порядку, а алгоритм Левенберга – Марквардта перетворюється в алгоритм Гаусса-Ньютона, який характеризується квадратичною збіжністю до оптимального рішення.

7.2 Процедура локалізації

Алгоритм заснований на виявленні аномальних спотворень магнітного поля Землі внаслідок руху феромагнітної маси. Після виявлення ініціюється алгоритм локалізації: магнітне поле \vec{B} створюється феромагнітною циліндром з моментом \vec{m} і дистанцією \vec{r} визначається як співвідношення:

$$\vec{B}(\vec{r}, \vec{m}) = \frac{3 \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{(\vec{m} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{r}}{R^5} - \frac{\vec{m}}{R^3} \right]$$

Де $m = (M_x, M_y, M_z)$ і $R = |\vec{r}|$. Візьмемо систему як масив датчиків, тоді відстань \vec{r} залежить від фіксованого положення датчиків. З цього випливає, що для кожного датчика $\vec{r} = \vec{r}_{\text{джерела}} - \vec{r}_{\text{датчика}}$.

Є загальновизнане правило: якщо відстань між центром джерела та датчиком хоча б в 2.5 рази більша за найбільший розмір джерела, тоді джерело можна розглянути як магнітний диполь. Нехай джерела будуть розміром приблизно в 10см, тоді на рисунку 7.1 видно, що в системі це правило дотримано

Розширення поля, включаючи три його компоненти, дає:

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \begin{pmatrix} 3x^2 - R^2 & 3xy & 3xz \\ 3yx & 3y^2 - R^2 & 3yz \\ 3zx & 3zy & 3z^2 - R^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}$$

Магнітне поле Землі фільтрується самим датчиком. Оскільки(17), метод найменших квадратів може ефективно застосовуватися для отримання наближеного рішення сильно детермінованої системи, в нашому випадку нелінійність магнітних рівнянь будемо вирішувати за допомогою нелінійних найменших квадратів[12].

Беручи до уваги набір пар емпіричних даних(t_i, y_i) (де y_i – виміряна точка даних в момент часу t_i) оптимізуємо параметри p модельної кривої $f(t|p)$ таким чином, щоб сума квадратів відхилення була мінімальною:

$$S(p) = \sum_{i=1}^m [y_i - f(t_i|p)]^2$$

Де $p = (x, y, z, M_x, M_y, M_z)$.

Для того, щоб почати процес мінімізації, потрібно визначити початковий вектор параметра p . Виберемо його як початок осі і нульовий момент. На кожній

ітерації векторних параметрів p замінюється на $p + q$. Щоб визначити q , функції $f(p + q)$ апроксимуються їх лінеаризацією:

$$f(p + q) \approx f(p) + J(q)$$

де J - якобіан функції f у точці p . Як мінімум із сум квадратів S маємо $\nabla q S = 0$. Диференціювання квадрата правої частини рівняння вище і установка на 0 приводить до:

$$(J^T \cdot J)q = -J^T \cdot f$$

з якого q можна отримати шляхом інвертування $J^T J$. Це схема Гауса Ньютона, яка є найефективнішою, коли ми близькі до рішення. Ключом для використання алгоритму Левенберга є заміна цього рівняння на рівняння з «демпфованою версією»:

$$J^T \cdot J + \lambda \cdot I \cdot q = -J^T \cdot f$$

Позитивний коефіцієнт демпфірування λ коригується на кожній ітерації.

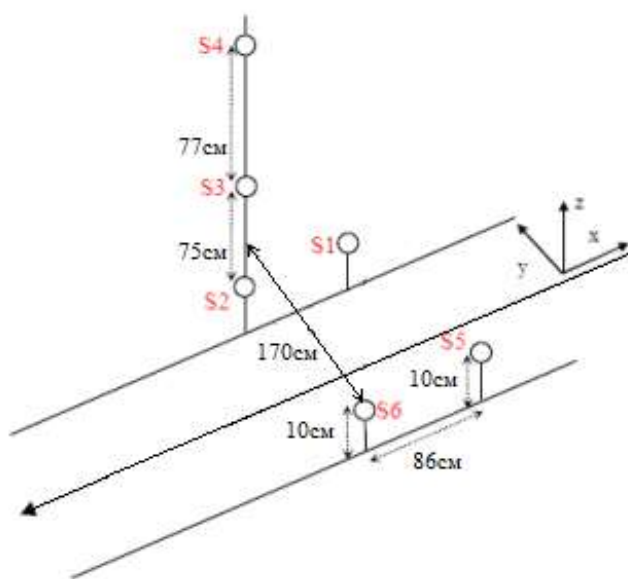


Рисунок 7.1 — Конфігурація датчиків

На рисунку 7.1 зображена траєкторія: координата x представляє рух по траєкторії, координата z дає висоту, на якій переноситься металевий об'єкт, і координата Y вказує сторону тіла, на якій розміщується об'єкт. Система розміщує початок осі $(0,0,0)$ на землі на однаковій відстані між $S2$ і $S6$.

Дві основні конфігурації були проаналізовані: вертикальна, де датчики розташовані на вертикальному кріпленні, та горизонтальна, де всі вони розташовані на рівні землі.

					BA71.060004.001 ПЗ	Арк.
						59
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

8. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК СИСТЕМИ

8.1 Похибка датчика магнітного поля НМС5833L від нелінійності

У датчика НМС5833L основною є похибка від не лінійності у діапазоні в якому проводиться вимірювання. Діапазон вимірювання датчику становить $(-0.008 \div +0.008)$ Тл , відносна похибка вимірювання – $\pm 0,1\%$ від інтервалу вимірювання. Похибка датчику від нелінійності розглянута в таблиці 8.1

Таблиця 8.1 Похибка датчику

Джерело похибки	Умови	Значення	Одинці вимірювання
Гістерезис	Вплив м.п. ± 2 Г	0.1	% від діапазону вимірювання

Абсолютна похибка датчика:

$$\Delta(B) = \frac{0.1 \cdot 0.0016}{100} = 1.6 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}$$

Згідно з технічним завданням діапазон вимірювання становить $(0 \text{ Тл} \div +0.0045 \text{ Тл})$, обчислимо адитивну систематичну похибку, яка є приведеною до діапазону в якому працює розроблена система:

$$\gamma_{\text{пр1}} = \frac{1.6 \cdot 10^{-6}}{0.0045} \cdot 100\% = 0.035\%$$

8.2 Статична похибка датчика магнітного поля НМС5833L

Згідно документації роздільна здатність датчика становить 12 біт, так як діапазон вимірювання становить 0.0016 Тл , найменший значущий біт при аналогово – цифровій обробці відповідає магнітному полю зі значенням

$$\Delta_{\text{ст.}} = \frac{0.0016}{4096} = 3.9 \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$$

Згідно з технічним завданням діапазон вимірювання становить (0 Тл ÷ + 0.0045 Тл), обчислимо адитивну систематичну похибку, яка є приведеною до діапазону в якому працює розроблена система:

$$\gamma_{\text{пр2}} = \frac{3.9 \cdot 10^{-7}}{0.0045} \cdot 100\% = 0.0025\%$$

8.2 Похибка датчика магнітного поля НМС5833L від гістерезису

Додатковою похибкою датчика НМС5833L є похибка від гістерезису. Ця похибка була розглянута в таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 Похибка датчику

Джерело похибки	Умови	Значення	Одинці вимірювання
Гістерезис	Вплив м.п. ± 2 Г	± 25	пропромлі

Похибка виражена у мільйонних долях (ppm), тобто вона залишається незмінною незалежно від значення виміряної величини в усьому діапазоні вимірювань.

З цього можна зробити висновок, що $\gamma_{\text{пр3}} = \beta_{\Gamma} = 25 \text{ ppm} = 25 \cdot 10^{-4}\%$

Сумарна похибка системи становить:

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{пр1}} + \gamma_{\text{пр2}} + \gamma_{\text{пр3}} = 0.0375 \%$$

Висновок:

В результаті розрахунку похибок ми отримали сумарну похибку системи, значення якої менше, ніж задано в ТЗ ($\gamma = 1 \%$).

9 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Метою дипломного проекту являється розробка системи локалізації магнітних аномалій. Головною метою проектування являється створення системи, яка буде задовольняти всі вимоги метрологічних характеристик і звичайно була б надійною і безпечною. Для задоволення цих потреб були проаналізовані відповідні до теми джерела, а також розроблені схеми:

- Структурна
- Функціональна
- Принципова

Щоб уникнути імовірні травми потрібно дотримуватись правил техніки безпеки та експлуатаційних обмежень.

До обмежень можна віднести:

- Регулярна перевірка технічного стану магнітометрів
- Дотримання послідовності включення і виключення магнітометрів
- Систематичний контроль працездатності
- Негайне усунення несправностей, що виникають в процесі експлуатації
- Також, під час експлуатації магнітометрів забороняється:
- Залишати неусунуті несправності магнітометрів
- Користуватись несправним інструментом
- При підготовці системи до використання необхідно виконувати наступні умови:
- Перед початком роботи проводити зовнішній огляд магнітометрів, щоб переконатись у відсутності пошкоджень корпусу
- Якщо магнітометри мають акумулятори, то при їх зарядці через зарядний пристрій потрібно спочатку з'єднувати магнітометр із зарядним пристроєм, а потім включати зарядний пристрій в мережу
- Переконатись у відсутності пошкоджень ізоляції кабелю зарядного пристрою.

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						62
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Головною загрозою являється ураження електричним струмом під час роботи з електроустановкою.

Електроустановка – це група електричного обладнання, яке взаємозалежне між собою, та за допомогою якого можна виробляти, транспортувати, розділяти електричну енергію.

Технічні засоби – елементи, які допомагають уникнути ураження електричним струмом.

До них можна віднести:

- Сигналізація.
- Ізоляція
- Екстрене вимкнення системи
- Заземлення

При роботі повинні бути дотримані вимоги, які викладені в «Правилах техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів».

Також, можна дотримуватись організаційних засобів для ще більшого рівня захисту, наприклад:

- Попередньо підготувати місце роботи
- Виконувати роботу за наявності кваліфікованих осіб, які будуть спостерігати за роботою електроустановок та за виконуючою особою.
- Робити перерви під час роботи.

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						63
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У результаті написання дипломної роботи було розроблено систему локалізації магнітних аномалій з використанням алгоритму Левенберга Марквардта.

В даній роботі були розроблені та описані структурна, на основі якої була розроблена функціональна і відповідно до неї принципова електричні схеми. Були розглянуті різні види магнітометрів та проведений аналіз аналогів на ринку. Також був написаний розділ техніки безпеки, за допомогою якого можливо мінімізувати отримання різних травм під час роботи з системою.

					ВА71.060004.001 ПЗ	Арк.
						64
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- [1] Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. Выбор электромагнитного метода зондирования для поиска объектов в толще укрывающих сред. [Электронный ресурс]: Специальная техника. -2007 .
- [2] <https://www.wikiwand.com/ru/%D0%9C%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80>
- [3] <https://elaso.com.ua/products/3-specialnoe-oborudovanie/0-izmeriteli-magnitnogo-polya/name/15706-3-osevoy-magnitometr/article>
- [4] http://kladoiskatel.net/SHANS_34.html
- [5] <https://elaso.com.ua/products/0-kontrolno-izmeritelnye-pribory/14-izmeriteli-elektromagnitnogo-polya/name/1164-tm-192d>
- [6] Научные исследования, проводимые в РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина для решения задач нефтегазовой отрасли России. В.Г. Мартынов
- [7] Дослідження електромагнітних процесів у вузлах електроенергетичного обладнання та їх використання для підвищення його надійності / Н. А. Шидловська, Ю. М. Васецький, М. В. Мислович, В. В. Твердяков // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. - 2015
- [8] https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf
- [9] https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE493D-A1B6-DataSheet-v01_20-EN.pdf?fileId=5546d462602a9dc801606f142b5c7fe5
- [10] <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f070c6.pdf>
- [11] Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. - М.: Финансы и статистика, 2002 , стр 65-67
- [12] Roger Alimi, Nir Geron, Eyal Weiss and Tsurriel Ram-Cohen . Ferromagnetic Mass Localization in Check Point Configuration Using a Levenberg Marquardt

[illegible]