

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Приладобудівний факультет  
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
Володимир ЄРЕМЕНКО  
«\_\_\_» червня 2023 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: «Автоматизована система вимірювання параметрів магнітного  
поля рухомого об'єкту»**

Виконав:  
студент IV курсу, групи ПА-91  
Омеляшко Іван Олексійович

\_\_\_\_\_

Керівник:  
Доцент, к.т.н., доцент  
Самарцев Юрій Миколайович

\_\_\_\_\_

Консультант із нормоконтролю  
Доцент, к.т.н., доцент  
Самарцев Юрій Миколайович

\_\_\_\_\_

Рецензент:  
асистент, к.т.н.  
Котляр Світлана Сергіївна

\_\_\_\_\_

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

КИЇВ – 2023

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Приладобудівний факультет  
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
Володимир ЄРЕМЕНКО  
«\_\_\_» червня 2023 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: «Автоматизована система вимірювання параметрів магнітного  
поля рухомого об'єкту»**

Виконав:  
студент IV курсу, групи ПА-91  
Омеляшко Іван Олексійович

\_\_\_\_\_

Керівник:  
Доцент, к.т.н., доцент  
Самарцев Юрій Миколайович

\_\_\_\_\_

Рецензент:  
асистент, к.т.н.  
Котляр Світлана Сергіївна

\_\_\_\_\_

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

№ рядка	Формат	Позначення	Найменування	Аркуші	Примітка
1					
2			<u>Альбом 1</u>		
3					
4			<u>Текстова документація</u>		
5					
6			<u>Документація загальна</u>		
7					
8			<u>Заново розроблене</u>		
9					
10	A4		Завдання на дипломне	2	
11			проєктування		
12	A4		Анотація українською мовою	1	
13	A4		Анотація іноземною мовою	1	
14	A4	ПА91.100008.001 ПЗ	Пояснювальна записка	66	
15					
16			<u>Документація</u>		
17			<u>по збірним одиницям</u>		
18					
19			<u>Заново розроблена</u>		
20					
21	A4	ПА91.100008.001	Автоматизована система	1	
22			вимірювання параметрів		
23			магнітного поля рухомого		
24			об'єкту		
25			Специфікація		
26					
27					
28					
29					

					<b>ПА91.100008.001</b>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Автоматизована система вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту Опис	Літ.	Аркуш	Аркуші
Розроб.		Омеляшко І. О.					1	2
Перевір.		Самарцев Ю. М.						
Н. контр.		Самарцев Ю. М.						
Затв.		Єременко В. С.						
						<b>НТУУ «КПІ» ПБФ, гр. ПА-91</b>		

№ рядка	Формат	Позначення	Найменування	Аркуші	Примітка
1					
2			<u>Альбом 2</u>		
3					
4			<u>Графічна документація</u>		
5					
6			<u>Заново розроблена</u>		
7					
8	A1	ПА91.100008.001 E1	Автоматизована система	1	
9			вимірювання параметрів		
10			магнітного поля рухомого		
11			об'єкту		
12			Схема електрична		
13			структурна		
14					
15	A1	ПА91.100008.001 E2	Автоматизована система	1	
16			вимірювання параметрів		
17			магнітного поля рухомого		
18			об'єкту		
19			Схема електрична		
20			функційна		
21					
22	A1	ПА91.100008.001 E3	Автоматизована система	1	
23			вимірювання параметрів		
24			магнітного поля рухомого		
25			об'єкту		
26			Схема електрична		
27			принципова		
28					
29					

					Арк.
ПА91.100008.001					2
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

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

**Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій**

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

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Омеляшко Іван Олексійович**

1. Тема проєкту «Автоматизована система вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту», керівник проєкту Самарцев Юрій Миколайович, к.т.н. доцент, затверджені наказом по університету від «30» травня 2023 р. № 2057-с
2. Термін подання студентом проєкту \_\_\_\_\_
3. Вихідні дані до проєкту Діапазон індукції магнітного поля:  $-0.0002 \div +0.0002$  Тл, напруга живлення: 27 VAC, інтерфейс: RS232, кількість проєкцій – 3.
4. Зміст пояснювальної записки Вступ. Огляд існуючих технічних рішень. Вибір та обґрунтування обраного рішення, Розробка структурної схеми. Розробка функційної схеми. Розробка принципової схеми. Рівняння функції перетворення та аналіз невизначеності результатів вимірювання. Висновки. Перелік джерел посилання.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Схема електрична структурна. Схема електрична функційна. Схема електрична принципова.

7. Дата видачі завдання 23.02.2023 р.

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Розробка та узгодження технічного завдання	23.02.2023 р.	
2.	Огляд і аналіз існуючих технічних рішень	13.03.2023 р.	
3.	Вибір та обґрунтування обраного рішення	27.03.2023 р.	
4.	Розробка структурної схеми	10.04.2023 р.	
5.	Розробка функційної схеми	24.04.2023 р.	
6.	Розробка принципової схеми	08.05.2023 р.	
7.	Створення рівняння функції перетворення та аналіз невизначеності результатів вимірювання	16.05.2023 р.	
8.	Оформлення графічних матеріалів	22.05.2023 р.	
9.	Оформлення пояснювальної записки	02.06.2023 р.	
10.	Перевірка на плагіат	10.06.2023 р.	
11.	Попередній захист дипломного проекту	12.06.2023 р.	
12.	Захист дипломного проекту	19.06.2023 р.	

Студент

Іван Омеляшко

Керівник

Юрій Самарцев

## АНОТАЦІЯ

В даному дипломному проєкті розроблена автоматизована система вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту з метою точного та швидкого визначення параметрів магнітного поля рухомого об'єкту та передачі цієї інформації персональному комп'ютеру для обробки.

В дипломному проєкті був проведений огляд існуючих технічних рішень, обрано та обґрунтовано обрані рішення, розглянуто принцип дії системи, розроблено структурну, функційну та принципову схеми.

Графічна частина проєкту представлена на трьох аркушах формату А1 і містить:

- схему електричну структурну автоматизованої системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту;
- схему електричну функційну автоматизованої системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту;
- схему електричну принципову автоматизованої системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту.

## ANNOTATION

In the graduation project developed an automated system for measuring the parameters of the magnetic field of a moving object to accurately and quickly determine the parameters of the magnetic field of a moving object and transfer this information to a personal computer for processing.

In the graduation project existing technical solutions, selected and justified the chosen solutions, considered the principle of operation of the system, and developed a structural diagram, a function diagram, and a schematic diagram.

The graphic part of the project is presented on three A1 sheets and includes:

- electrical structural diagram of the automated system for measuring the magnetic field parameters of a moving object;
- electrical function diagram of the automated system for measuring the parameters of the magnetic field of a moving object;
- electrical schematic diagram of the automated system for measuring the parameters of the magnetic field of a moving object.

Поз.	Найменування		Кіл.	Примітка
<u>Конденсатори</u>				
C1	100mkFx50V	CPOL-EU140CLH-1010	1	
C2...C4	1mkF	C0603	3	
C5...C7	140pF	C0603	3	
C8, C9	10pF	C0603	2	
C10, C11	6pF	C0603	2	
C12, C13	4.4µF	C0603	2	
C14...C16	4.7µF	C0603	3	
C17...C22	1µF	C0603	6	
C23...C25	0.1µF	C0603	3	
C26...C28	0.22µF	C0603	3	
<u>Мікросхеми</u>				
DD1	STM32F207VCT		1	
DD2	MAX232		1	
DA1	TES3-1223		1	
DA2	LM2596TH		1	
DA3	LP2950Z		1	
DA4	HMC1001		1	
DA5	HMC1002		1	
DA6, DA7	AD8656R		2	
DA8...DA10	AD8422ARZ		3	
DA11	IRF7105TRPBF		1	
DA12	MAX662ACPA		1	
<u>Резистори</u>				
R1	2	R-EU_R0603	1	
R2, R3	10M	R-EU_R0603	2	
R4...R13	1k	R-EU_R0603	10	
<b>ПА91.100008.001</b>				
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Омеляшко І. О.			
Перев.	Самарцев Ю. М.			
Н. Контр.	Самарцев Ю. М.			
Затв.	Єременко В. С.			
Автоматизована система вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту Специфікація		Літ.	Аркуш	Аркушів
			1	2
		НТУУ «КПІ» ПБФ, гр. ПА-91		



**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проєкту**  
**на тему: “Автоматизована система вимірювання параметрів**  
**магнітного поля рухомого об’єкту”**

Київ - 2023 року

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	4
ВСТУП .....	5
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ .....	7
1.1 Магнітне поле, визначення та опис .....	7
1.1.1 Закон Біо-Савара-Лапласа .....	11
1.1.2 Магнітне поле прямого провідника зі струмом .....	12
1.1.3 Магнітне поле контуру зі струмом в довільній точці .....	13
1.1.4 Магнітне поле соленоїда .....	15
1.2 Види джерел магнітного поля .....	17
1.2.1 Природне магнітне поле .....	17
1.2.2 Магнітне поле рухомих електричних зарядів .....	18
1.2.2.1 Магнітний диполь .....	19
1.3 Існуючі системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту .....	20
1.3.1 Системи з використанням датчиків Холла .....	23
1.3.2 Системи з використанням феррозондових магнітометрів .....	25
1.3.3 Системи з використанням магніторезистивних датчиків .....	26
1.3.4 Спеціалізовані системи .....	29
Висновок до розділу 1 .....	32
2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО РІШЕННЯ .....	33
Висновок до 2 розділу .....	38
3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ .....	39
Висновок до 3 розділу .....	41
4 РОЗРОБКА ФУНКЦІЙНОЇ СХЕМИ .....	42
Висновок до 4 розділу .....	45

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>Автоматизована система вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту. Пояснювальна записка</i>									
Розроб.		Омеляшко І. О.								Літ.	Арк.	Акрушів		
Перевір.		Самарцев Ю.М.									2	66		
Н. Коитр.		Самарцев Ю.М.								<i>НТУУ «КПІ» ПБФ, гр. ПА-91</i>				
Затверд.		Єременко В. С.												

5 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ.....	46
Висновок до 5 розділу.....	55
6 РІВНЯННЯ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ.....	56
6.1 Рівняння функції перетворення.....	56
6.2 Аналіз невизначеності результатів вимірювання.....	59
Висновок до 6 розділу.....	61
ВИСНОВОКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	63

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПВП МП – первинний вимірювальний перетворювач магнітного поля

ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач

МК – мікроконтролер

БЖ – блок живлення

БПІ – блок перетворення інтерфейсів

ПК – персональний комп'ютер

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

USART – Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter  
(Універсальний синхронний/асинхронний приймач-передавач)

COM-порт – communications port (послідовний порт)

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

## ВСТУП

Дипломний проєкт присвячений розробці автоматизованої системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту.

У сучасному світі, де технологічний прогрес є неодмінною частиною життя людей, постійно зростає потреба в автоматизації процесів та удосконаленні технічних засобів. Однією з важливих галузей, де потрібні нові рішення та технології, є магнітні вимірювання.

Магнітні поля є складною фізичною величиною, яка може бути виміряна за допомогою спеціальних приладів. Одним з основних напрямків використання магнітних вимірювань є визначення параметрів магнітного поля рухомого об'єкту. Це може бути важливо для розробки нових систем транспорту, рухомих машин та механізмів, а також для контролю за рухом техніки, визначення координат місцезнаходження та управління її рухом. Що є важливою для багатьох областей науки та техніки, включаючи електротехніку, мехатроніку, авіацію, мореплавство, космічну техніку та біомедичну інженерію.

Метою даного дипломного проєкту є розробка автоматизованої системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту. Основна ідея полягає у створенні системи, яка буде здатна точно та швидко визначати параметри магнітного поля рухомого об'єкту та передавати цю інформацію на обробку.

У роботі проведено аналіз існуючих методів та технологій вимірювання параметрів магнітного поля. Розглянуто можливості застосування сенсорів, електронних компонентів та програмного забезпечення для розробки автоматизованої системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

Крім того, описані основні принципи роботи розробленої системи, її характеристики та можливості вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту. Також розглянуто питання зберігання та передачі даних, а також їх захисту від несанкціонованого доступу.

Основною метою розробки такої системи є створення точного та ефективного засобу контролю за параметрами магнітного поля рухомого об'єкту. Для досягнення цієї мети система повинна мати наступні характеристики:

Висока точність вимірювань. Система повинна бути здатна точно вимірювати параметри магнітного поля з високою точністю.

Автоматизація процесу вимірювання. Система повинна бути повністю автоматизованою, що дозволяє зменшити можливість помилок та скоротити час, необхідний для вимірювання параметрів магнітного поля.

Можливість працювати в широкому діапазоні температур та інших умов. Система повинна бути здатна працювати в різних умовах, включаючи різні температури та вологість.

Простота та надійність. Система повинна бути простою у використанні та обслуговуванні, а також надійною та стійкою до зовнішніх впливів.

Наявність програмного забезпечення для обробки та аналізу даних: Система повинна мати вбудоване програмне забезпечення для обробки та аналізу даних, яке дозволяє легко та швидко інтерпретувати результати.

Загалом, розробка автоматизованої системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту є важливою задачею, яка може знайти своє використання у різних галузях промисловості та науки. Результатом цієї роботи стало створення нового технічного засобу, який дозволить отримувати точні та швидкі вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

# 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

## 1.1 Магнітне поле, визначення та опис

Для розробки автоматизованої системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту було розглянуто таке явище, як магнітне поле.

Магнітне поле — фізичне поле, яке діє на рухомі електричні заряди і на тіла, що володіють магнітним моментом або інша інтерпретація пояснення, що це особливий вид матерії, який проявляється в дії на магнітну стрілку, на рамку зі струмом і на заряд, що рухається. Магнітне поле створюється провідником зі струмом, що рухаються зарядами, намагніченими тілами, а також змінним електричним полем.

Магнітне поле є векторним полем, яке може описуватися різними характеристиками. Основні характеристики об'єктів дослідження магнітного поля включають:

Вектор потенціалу магнітного поля ( $\vec{A}$ ): це векторне поле, що відображає розподіл магнітного поля у просторі. Вектор потенціалу магнітного поля може бути визначений з рівняння наближеного електромагнітного поля, так званого рівняння Максвелла.

Індукція магнітного поля ( $\vec{B}$ ): це векторна величина, що відображає силу, з якою магнітне поле впливає на рухомі заряди. Індукція магнітного поля залежить від сили струму та відстані між струмом і точкою спостереження.

Сила Лоренца: це векторна величина, яка описує силу, з якою магнітне поле впливає на рухомий заряд. Сила Лоренца може бути визначена з рівняння наближеного електромагнітного поля.

					ПА91.100008.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Магнітна енергія: це енергія, що міститься в магнітному полі. Магнітна енергія може бути визначена з взаємодії між магнітним полем та зарядами або струмом.

Магнітна індуктивність ( $L$ ): це властивість матеріалів, яка описує їх здатність генерувати магнітне поле відносно величини струму, що протікає через них. Магнітна індуктивність залежить від матеріалу та форми об'єкта, що використовується для генерації магнітного поля.

Магнітний момент ( $\vec{M}$ ): це векторна величина, яка відображає силу, яку породжує магнітний диполь. Магнітний момент може бути визначений як добуток індукції магнітного поля на площину контуру магнітного диполя.

Магнітна проникність ( $\mu$ ): це властивість матеріалів, яка відображає їх здатність реагувати на магнітне поле. Магнітна проникність може бути визначена відношенням індукції магнітного поля до напруженості магнітного поля.

Напруженість магнітного поля ( $H$ ): це векторна величина, яка відображає силу, з якою магнітне поле діє на магнітний диполь. Напруженість магнітного поля може бути визначена з рівняння наближеного електромагнітного поля.

Потік магнітного поля ( $F$ ): це міра кількості магнітного поля, що проходить через певну поверхню. Потік магнітного поля може бути визначений з інтегралу індукції магнітного поля через поверхню.

Магнітна постійна ( $\mu_0$ ): це фундаментальна константа в фізиці та має значення

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \text{ або приближене } \mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

Ці характеристики магнітного поля допомагають визначити різні аспекти магнітного поля та його взаємодії з іншими фізичними системами.

Силовою характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції  $\vec{B}$ . Для наочного зображення стаціонарних магнітні поля використовують силові лінії.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Силowymi лініями магнітного поля називаються криві, проведені в просторі так, що у кожній точці поля дотична до такої лінії збігається з напрямком вектор  $B$  цій точці. Ці криві безперервні. На відміну від потенційного електричного поля, де силові лінії починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних, магнітне поле є вихровим: його силові лінії завжди замкнені і не перетинаються один з одним. Іншими словами, магнітне поле немає магнітних зарядів як джерела поля.

На відміну від електричного поля силову характеристику магнітного поля з причин історичного характеру називають не напруженістю, а індукцією. Індукція магнітного поля – це векторна величина.

В системі СІ за одиницю магнітної індукції тесла (Тл) прийнято індукція такого поля, в якому на провідник завдовжки 1 м зі струмом 1 А діє сила 1 Н.

$$Tл = \frac{H}{A \cdot m} \quad (1)$$

У системі СГС за одиницю магнітної індукції прийнято гаус (Гс)

$$1 Tл = 10^4 Гс.$$

Як і у випадку електричного поля, картину магнітних силових ліній можна зробити "видимою". Для цього використовують дрібні залізні тирсу, яка в магнітному полі намагнічується і, подібно маленьким магнітним стрілкам, орієнтуються вздовж силових ліній. На рисунку 1 наведені одержувані таким чином картини магнітних полів: а) поле постійних магнітів; б) поле кругового струму та в) поле довгої котушки (соленоїда).

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

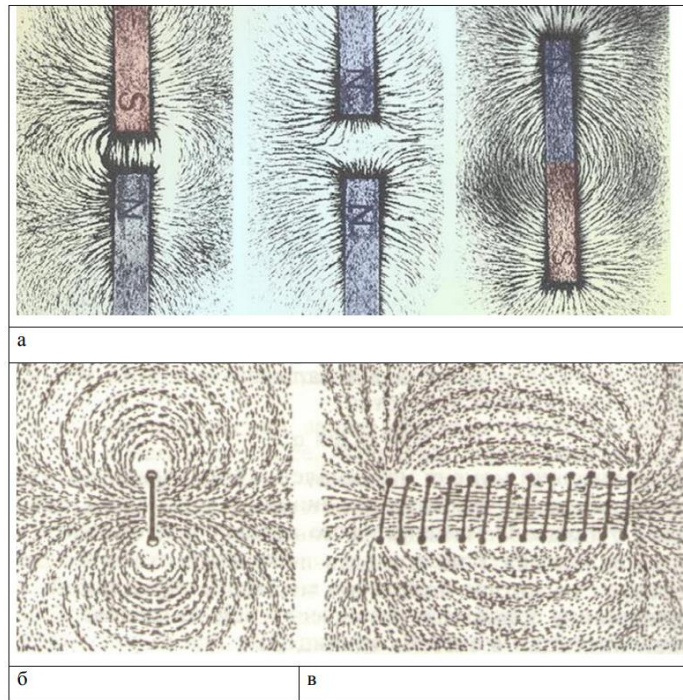


Рисунок 1.1 – Приклади візуалізації магнітних полів: а – поле постійних магнітів, б – поле витка зі струмом, в – поле соленоїда

Для розрахунку магнітних полів, створюваних заданими струмами, необхідно враховувати, що індукція магнітного поля, створюваного поточним по провіднику струмом, визначається спільною дією всіх окремих ділянок провідника. Магнітне поле задовольняє принцип суперпозицій, тобто. принципу незалежної дії полів, що враховує векторний характер магнітної індукції:

$$\vec{B} = \int d\vec{B} \quad (2)$$

де  $d\vec{B}$  – індукція магнітного поля, створеного елементом провідника  $dl$  струмом  $I$  (Рисунок 2).

Для розрахунку магнітної індукції найчастіше застосовують закон Біо-Савара-Лапласа.

### 1.1.1 Закон Біо-Савара-Лапласа

Елемент провідника  $d\vec{l}$  зі струмом  $I$  створює у певній точці магнітне поле з індукцією

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3} \quad (3)$$

Де  $\mu_0$  – магнітна постійна ( $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  Гн/м),  $r$  – радіус-вектор, проведений з елемента  $d\vec{l}$  провідника дану точку простору. На досвіді неможливо здійснити окрему ділянку струму, так що не можна безпосередньо виміряти і створюване ним поле. Виміряти можна тільки сумарну індукцію магнітного поля, створюваного всіма елементами замкнутого струму. Застосовуючи закон Біо-Савара-Лапласа до ділянок провідника довільної форми, можна розрахувати значення результуючої індукції магнітного поля. Слід зауважити, що розрахунок результуючої індукції магнітного поля за допомогою закону Біо-Савара-Лапласа виконується найбільш просто, якщо поле створене провідником зі струмом, має певний тип симетрії. У відсутність симетрії розрахунок також можливий, але вже з використанням чисельних методів [1].

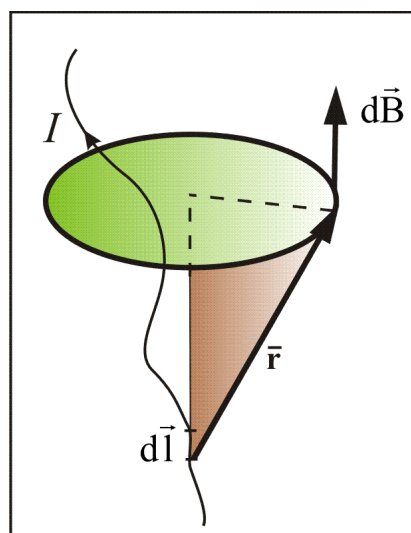


Рисунок 1.2 – Елемент провідника  $d\vec{l}$  зі струмом  $I$  створює в точці, розташованій на відстані  $r$  від провідника, магнітне поле з індукцією  $d\vec{B}$





Вирази для  $d\bar{l}$  і  $\bar{r}$  матимуть вигляд:

$$d\bar{l} = \begin{pmatrix} -R \cos \varphi \\ -R \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{r} = \begin{pmatrix} R \sin \varphi \\ -(R \cos \varphi - y) \\ z \end{pmatrix} \quad (7)$$

Отримаємо їхній векторний добуток:

$$[d\bar{l} \times \bar{r}] = \begin{pmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ -R \cos \varphi & -R \sin \varphi & 0 \\ R \sin \varphi & -(R \cos \varphi - y) & z \end{pmatrix} d\varphi = \begin{pmatrix} -Rz \sin \varphi \\ Rz \cos \varphi \\ R(R - y \cos \varphi) \end{pmatrix} d\varphi \quad (8)$$

Тоді компоненти вектора магнітної індукції мають вигляд:

$$B_x = (y, x) = -\frac{\mu_0 IR_z}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\sin \varphi}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cdot \cos \varphi)^{\frac{3}{2}}} \cdot d\varphi \quad (9)$$

$$B_y = (y, x) = -\frac{\mu_0 IR_z}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cdot \cos \varphi)^{\frac{3}{2}}} \cdot d\varphi \quad (10)$$

$$B_z = (y, x) = -\frac{\mu_0 IR_z}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{R - y \cos \varphi}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cdot \cos \varphi)^{\frac{3}{2}}} \cdot d\varphi \quad (11)$$

Найбільш прості та наочні результати виходять для випадку  $x = y = 0$ ,  $z$  – довільне число. В цьому випадку

$$B_x(0, z) = B_y(0, z) = 0,$$

$$B_z(0, z) = \frac{\mu_0 IR^2}{4\pi \cdot (R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14



Для обчислення індукції магнітного поля  $\vec{B}$  всередині одношарового соленоїда представимо його у вигляді суперпозиції кільцевих струмів, що лежать на одній осі - осі соленоїда (Рисунок 6) і скористаємося теоремою проциркуляції:

$$\oint_{ABCD} B_l dl = \int_{AB} B_l dl + \int_{BC} B_l dl + \int_{CD} B_l dl + \int_{DA} B_l dl = \mu_0 \sum_{i=0}^N I_i \quad (13)$$

Якщо знехтувати крайовими ефектами, то перший і третій складові в формулі (13) дорівнюють нулю, так як магнітне поле перпендикулярно контуру та  $B_l = 0$ . Якщо контур вибрати так, що  $AD$  лежатиме на великому відстані від соленоїда, де поле прагне нуля, те й четверте доданок (13) також звернеться в нуль. Тоді, враховуючи наближення однорідності поля, отримаємо:

$$B_l L = \mu_0 N I \quad (14)$$

де  $L$  – довжина соленоїда,  $N$  – кількість витків. Якщо ввести поняття щільності витків (число витків на одиницю довжини)  $n = \frac{N}{L}$ , то індукцію магнітного поля всередині соленоїда (14) можна записати у вигляді:

$$B = \mu_0 n I \quad (15)$$

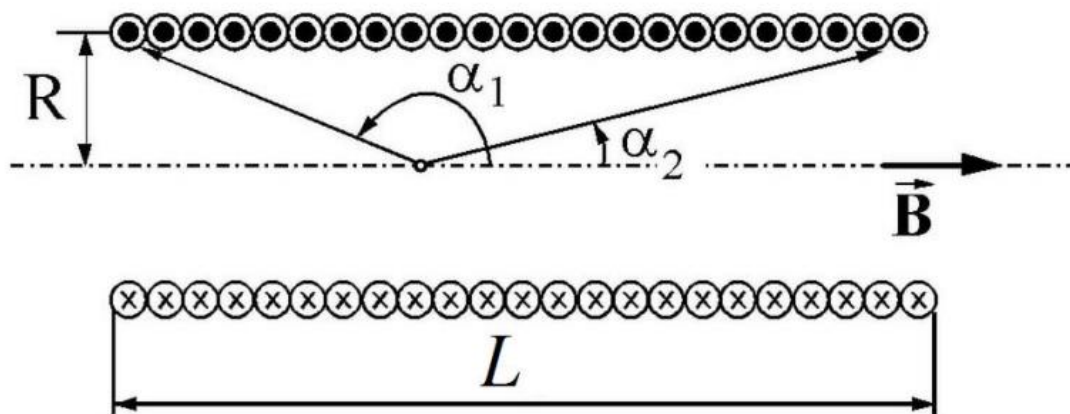


Рисунок 1.7 – Соленоїд з довільними розмірами  $L$  та  $R$

Щоб отримати точний вираз для індукції магнітного поля в будь-якій точці на осі кінцевого соленоїда необхідно скористатися законом Біо-Савара-Лапласа (Рисунок 7), який призводить до наступного виразу:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (16)$$

В окремому випадку, всередині соленоїда, де магнітне поле максимально вираз для індукції матиме вигляд:

$$B_{max} = \frac{\mu_0 n I L}{\sqrt{4R^2 + L^2}} \quad (17)$$

де  $R$  - радіус соленоїда. А на краю напів нескінченного соленоїда:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I \quad (18)$$

## 1.2 Види джерел магнітного поля

### 1.2.1 Природне магнітне поле

Магнітне поле Землі - це велике і складне магнітне поле, яке оточує нашу планету і виникає в результаті руху рідкого заліза в зовнішньому ядрі Землі. Магнітне поле Землі має форму гігантського магніту, з полюсами на північному та південному полюсах. Воно змінюється та коливається в залежності від багатьох факторів, таких як сонячна активність та геометрія ядра Землі. Для вимірювання магнітного поля Землі використовуються магнітометри.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

## 1.2.2 Магнітне поле рухомих електричних зарядів

Всі інші існуючі джерела магнітного поля є індукованими магнітним полем Землі. А саме значенням цих джерел при вимірюванні буде сума дійсного значення джерела магнітного поля і поля Землі.

$$B = B_{дж} + B_3 \quad (19)$$

Джерела електричного струму: Електричний струм є одним з основних джерел магнітного поля. Коли електрони рухаються через провідник, вони генерують магнітне поле навколо провідника.

Магнітні матеріали: деякі матеріали, такі як феромагнетики, мають властивості генерувати магнітне поле самостійно. Ці матеріали містять мініатюрні магнітні диполі, які взаємодіють один з одним і генерують магнітне поле.

Електромагніти: Електромагніти - це прилади, які генерують магнітне поле з використанням електричного струму. Наприклад, електромагніти можуть використовуватися для створення магнітного поля у дослідженнях фізики частинок або для магнітної сортування відходів.

Магнітні бурі: Магнітні бурі виникають, коли заряджені частинки від сонячного вітру взаємодіють з магнітним полем Землі. Ці бурі можуть впливати на супутники, трансформатори і інші електронні прилади на Землі.

Магнітні хмари: Магнітні хмари виникають, коли газові хмари у космосі взаємодіють з магнітним полем. Ці хмари можуть мати великий вплив на галактики і зірки.

Електромагнітні хвилі: Електромагнітні хвилі, такі як світло і радіохвилі, мають магнітне поле, яке генерується змінним електричним полем.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		18

У кожного джерела магнітного поля є свої особливості і характеристики, які визначають властивості магнітного поля, що генерується. Наприклад, магнітне поле, яке генерується електричним струмом, залежить від інтенсивності струму та форми провідника, через який протікає струм.

У магнітних матеріалах, таких як феромагнетики, магнітне поле залежить від спіну електронів, які утворюють мініатюрні магнітні диполі. Магнітні поля, які генеруються електромагнітами, можуть бути налаштовані для відповідних застосувань, наприклад, для магнітного сортування відходів або для створення магнітного поля для досліджень фізики частинок.

Магнітні бурі та магнітні хмари можуть мати значний вплив на природу та технології. Наприклад, магнітні бурі можуть спричинити коротке замикання в електричних мережах та впливати на роботу супутників, а магнітні хмари можуть впливати на зірки та галактики.

В загальному, ми можемо розглянути будь-які джерела магнітного поля, змодельовавши або представивши їх у вигляді магнітного диполя.

#### 1.2.2.1 Магнітний диполь

Довільне магнітне поле, що створено декількома джерелами, описують моделлю, що складається з певного числа магнітних диполів, для аналітичного дослідження впливу магнітних полів джерел рухомого об'єкту на загальне магнітне поле. Магнітний диполь – складається з кругового струму з відомим значенням діаметру кола та сили струму. Ця система може бути представлена у вигляді вектора магнітної індукції (магнітного поля) і має характеристики, які дозволяють розраховувати її вплив на навколишнє середовище [3].

Одна з ключових характеристик магнітного диполя - це магнітний момент, який визначається як добуток магнітної індукції на площу кругового струму:

$$m = B \cdot S_i, \quad (20)$$

де  $m$  - магнітний момент,  $B$  - магнітна індукція, а  $S_i$  - площа кругового струму.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Вектор магнітного диполя можна знайти за правилом буравчика. Правило буравчика - це правило, що дозволяє визначити напрям індукції магнітного поля, що створюється магнітним диполем, та його взаємодію з іншими магнітними полями. Згідно з цим правилом, напрям магнітного поля визначається так: якщо вставити магнітний диполь у дірку буравчика та обертати його у напрямку від північного магнітного полюсу до південного, то напрям магнітного поля буде збігатися з напрямком обертання.

Магнітними диполями можна описати магнітні поля на певній відстані від них. Якщо магнітні диполі розташовані в певних напрямках, то їх магнітні поля можуть посилити або зменшити одне одного. Крім того, магнітні диполі можуть взаємодіяти з іншими магнітними полями та зарядженими частинками, зокрема з електричними диполями.

Узагальненням магнітних диполів є магнітні мультиполі, які складаються з більшої кількості магнітних диполів або магнітних моментів. Магнітні мультиполі використовуються для опису магнітних полів більш складних систем, таких як магнітні матеріали або струми в провідниках.

Ми можемо користуватися магнітним диполем для знаходження положення самого джерела магнітного поля у просторі, або виявити вплив магнітного поля на оточення.

### 1.3 Існуючі системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту

Системи вимірювання параметрів магнітного поля об'єктів використовуються для визначення різних характеристик магнітного поля, таких як сила, напрямок, величина та розподіл магнітного поля на поверхні об'єкта.

Однак всі існуючі первинні вимірювальні перетворювачі вимірюють лише значення індукції магнітного поля. Завдяки якому, використовуючи перетворення, ми можемо отримувати шукані значення.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Однією з найпоширеніших систем вимірювання є магнітометр. Він використовує принцип вимірювання змін магнітного поля від певного джерела, зазвичай збудженого електричним струмом, що розташоване на певній відстані від об'єкта.

Інші системи вимірювання можуть включати магнітні сенсори, які можуть бути вбудовані в пристрої або використовувати зовнішні датчики для вимірювання магнітного поля.

Первинними перетворювачами магнітного поля в системах зазвичай є давачі (датчики, сенсори) магнітної індукції.

Також можуть використовуватись магнітно-резонансні та магнітно-індукційні системи для вимірювання магнітного поля в об'єктах.

Такі системи можна розбити на декілька типів систем вимірювання параметрів магнітного поля об'єктів у русі. Ось декілька з них:

Магнітний візерунок - це система вимірювання, яка використовує звичайний компас для визначення магнітного поля. Зміна магнітного поля об'єкта в русі впливає на показання компаса, що дозволяє визначити характеристики магнітного поля. Ця система вимірювання використовується для вимірювання магнітного поля землі, а також для вимірювання магнітного поля на поверхні великих транспортних засобів, наприклад, на літаках і кораблях.

Магнітні індукційні датчики - це система вимірювання, яка використовує електромагнітні датчики для вимірювання магнітного поля об'єкта. Датчик здатний вимірювати зміну магнітного поля, коли об'єкт рухається поруч з датчиком. Ця система вимірювання використовується в авіації та автомобілебудуванні для вимірювання швидкості, пройденого шляху, показників напруги тощо.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		21

Градiєнтнi системи - це система вимiрювання, яка використовує магнiтнi датчики, розташованi на вiдстанi один вiд одного. Цi датчики вимiрюють магнiтне поле в рiзних точках та дозволяють визначити градiєнт магнiтного поля - тобто, змiну магнiтного поля з точки на точку. Ця система вимiрювання використовується в магнiтно-резонанснiй томографiї (МРТ) для вiзуалiзацiї м'яких тканин тiла.

Супутниковi системи - це система вимiрювання, яка використовує супутники для вимiрювання параметрiв магнiтного поля Землi i iнших об'єктiв у русi. Супутники використовуються для вимiрювання магнiтного поля Землi для створення магнiтної карти Землi, яка допомагає навігацiї. Крім того, супутниковi системи використовуються для вимiрювання магнiтного поля на сонцi, планетах та iнших космiчних об'єктах.

Магнiтнi антени - це система вимiрювання, яка використовує антени для вимiрювання параметрiв магнiтного поля. Магнiтнi антени використовуються в областi радіозв'язку та радіолокацiї для вимiрювання напруги та потужностi електромагнiтного поля, що передається вiд антени.

Усi цi системи вимiрювання магнiтного поля використовуються в рiзних галузях, таких як авiацiя, автомобiлебудування, медицина, наука та космiчна iндустрiя. Вони дозволяють вимiрювати параметри магнiтного поля, необхіднi для визначення характеристик об'єктiв у русi та для вирiшення рiзних технiчних завдань [4, 5, 6].

iснують рiзнi системи вимiрювання параметрiв магнiтного поля об'єктiв у русi, залежно вiд того, якi параметри потрiбно вимiряти i для яких цiлей.

Однiєю з найбільш поширених систем є магнiтнi компаси. Вони вимiрюють напрямок магнiтного поля та можуть бути використанi для навігацiї та орієнтування. Також iснують спеціальнi магнiтнi компаси для вимiрювання магнiтних параметрiв пiд час руху об'єкта.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Пiдпис</i>	<i>Дата</i>		22

Іншими системами є магнітні сенсори, які можуть вимірювати різні параметри магнітного поля, такі як інтенсивність, напрямок, частота, амплітуда тощо. Вони можуть використовуватися для контролю руху та позиції об'єкта у магнітному полі, а також для вимірювання параметрів у складних системах, таких як магнітно-резонансні томографи.

Крім того, існують спеціальні системи вимірювання магнітних параметрів у русі, такі як магнітометри на основі гравітаційних датчиків, які можуть вимірювати абсолютні значення інтенсивності магнітного поля.

Ще однією системою вимірювання параметрів магнітного поля є магнітно-індукційні датчики. Вони можуть вимірювати інтенсивність та напрямок магнітного поля, що змінюється з часом. Ці датчики використовуються у різних галузях, наприклад, у виробництві автомобілів для вимірювання швидкості обертання коліс, у вимірюваннях в електротехніці, а також в наукових дослідженнях.

### 1.3.1 Системи з використанням датчиків Холла

Для вимірювання параметрів магнітного поля в електричних машинах використовуються спеціальні датчики з галузевими назвами - "датчик холла" та "датчик ефекту Холла". Ці датчики засновані на ефекті Холла, тобто утворення напруги в провіднику, коли він поміщений у магнітне поле. Датчики на ефекті Холла зазвичай використовуються для вимірювання магнітних полів у різноманітних додатках, включаючи системи керування рухом, автомобільні програми та промислову автоматизацію. Одним із прикладів системи датчиків Холла є система вимірювання 3-осьовий магнітометр Холла Metrolab ТНМ1176.

ТНМ1176 є високоточним вимірювальним приладом магнітного поля, який широко використовується в наукових дослідженнях, промислових випробуваннях і додатках контролю якості. Магнітометр призначений для вимірювання сили та напрямку магнітних полів у трьох вимірах з роздільною здатністю 0,1 нТл (наноТесла) та точністю до 0,05%. Його діапазон становить від мкТл до 14 Тл, постійного струму до 1 кГц з точністю  $\pm 1\%$  [7].

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Прилад використовує датчики Холла для вимірювання магнітних полів, які чутливі до наявності магнітного поля та виробляють напругу, пропорційну його силі. Магнітометр ТНМ1176 складається з трьох ортогональних датчиків Холла, розташованих у компактному корпусі з низьким рівнем шуму, який можна встановити на штатив або іншу опору. Прилад зазвичай підключається до комп'ютера або реєстратора даних через інтерфейс USB, що дозволяє збирати та аналізувати дані в реальному часі.

Магнітометр ТНМ1176 здатний вимірювати як постійні, так і змінні магнітні поля в ряді додатків, включаючи картографування геомагнітного поля, тестування магнітних матеріалів і тестування на електромагнітну сумісність. Він також широко використовується для калібрування інших датчиків магнітного поля, таких як магнітометри, що використовуються в космічних кораблях і супутникових місіях.



Рисунок 1.8 – Магнітометр ТНМ1176

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24



Рисунок 1.9 – Ноутбук, підключений до THM1176-LF

Загалом, 3-осьовий магнітометр Холла Metrolab THM1176 є універсальним і надійним інструментом для вимірювання магнітних полів із високою точністю та точністю, що робить його цінним ресурсом для широкого спектру наукових і промислових застосувань [8].

### 1.3.2 Системи з використанням феррозондових магнітометрів

Феррозондові магнітометри: у цих датчиках використовується сердечник з магнітного матеріалу, який змінним струмом приводиться в насичення. Магнітне поле індукуює у вторинній обмотці напругу, пропорційну напруженості поля. Феррозондові магнітометри можуть вимірювати магнітні поля в широкому діапазоні частот, від постійного струму до кількох сотень кілогерц. Він зазвичай використовується в таких програмах, як навігація, геологія та космічні дослідження. Одним із прикладів системи феррозондового магнітометра є морський магнітометр Geometrics G-882 [9].



Рисунок 1.10 – Морський магнітометр Geometrics G-882

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

### 1.3.3 Системи з використанням магніторезистивних датчиків

Магніторезистивні датчики: ці датчики використовують зміну опору матеріалу у відповідь на магнітне поле. Магніторезистивні датчики мають високу чутливість і можуть використовуватися для вимірювання як постійного, так і змінного магнітних полів. Вони зазвичай використовуються в таких програмах, як магнітна пам'ять і навігація. Одним із прикладів магніторезистивної сенсорної системи є серія датчиків Honeywell HMC.

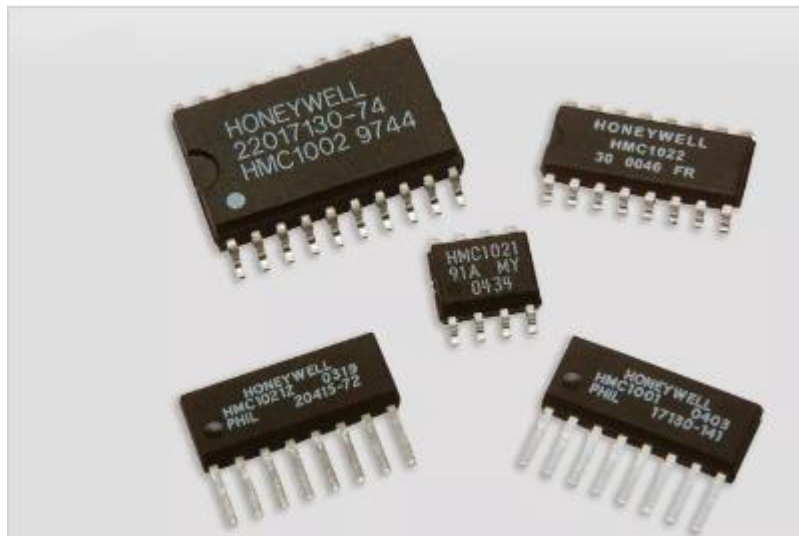


Рисунок 1.11 – Серія датчиків Honeywell HMC

Прикладом системи, що використовує магніторезистивні датчики можна розглянути Spectramag-6.

Система Spectramag-6 створена на базі датчика магнітного поля Mag-03.

Mag-03 — це тип тривісного датчика магнітного поля, який зазвичай використовується в електронних пристроях для визначення наявності та напрямку магнітного поля. Ці датчики також відомі як магнітометри.

Датчик Mag-03 може виявляти магнітні поля в трьох різних напрямках, які зазвичай називають осями X, Y і Z. Вимірюючи напруженість і напрямки магнітного поля в кожній із цих осей, датчик може визначити орієнтацію магнітного поля відносно датчика.

Датчики Mag-03 широко використовуються в різних сферах застосування, включаючи навігацію, робототехніку та автомобільні системи. Наприклад, їх можна використовувати в дронах і роботах для навігації та уникнення перешкод. Їх також можна використовувати в автомобільних системах для виявлення присутності інших транспортних засобів і для керування системами рульового керування та гальмування.



Рисунок 1.12 – Mag-03MS

Загалом датчики Mag-03 є універсальними та надійними пристроями, які широко використовуються в багатьох різних сферах застосування, де потрібне точне виявлення та вимірювання магнітних полів [10].

Spectramag-6 — це шестиканальна 24-розрядна система збору даних і спектрального аналізу, розроблена для використання з 3-осьовими феррозондовими магнітометрами Bartington Instruments Mag-03.

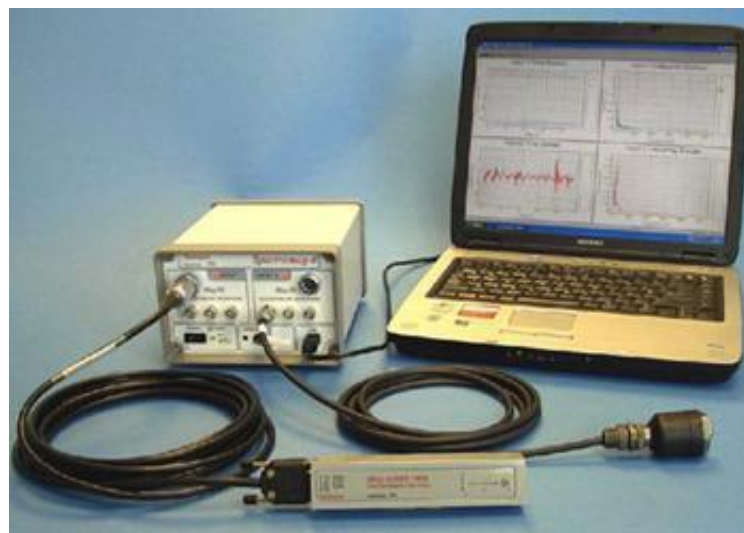


Рисунок 1.13 – Spectramag-6

Окрім магнітометрів, система також має інтерфейс ICP, що дозволяє підключати ряд акселерометрів і мікрофонів. Усі шість каналів одночасно відбираються, що робить Spectramag-6 ідеальним для запису та аналізу даних магнітного поля та/або вібрації по трьох осях. Типові застосування включають магнітні та вібраційні вимірювання для попереднього встановлення систем МРТ, електронних мікроскопів та подібного чутливого обладнання, загальні магнітні вимірювання, диференціальні вимірювання з подвійним магнітометром, обстеження на місці та запис магнітних полів через електроживлення 50/60 Гц. Пристрій може виявляти магнітні поля з частотою від 0,1 Гц до 2 кГц і вібрації з частотою від 0,5 Гц до 15 кГц.

Система складається з інтерфейсного блоку та програмного забезпечення ПК на базі Windows®. Блок інтерфейсу підключається до головного комп'ютера через з'єднання USB2. Програмний характер інструменту дозволяє легко оновлювати, просто завантажуючи останню версію програмного забезпечення з Інтернету.

Одним із основних застосувань Spectramag-6 є виявлення та аналіз магнітних полів і вібрацій у промислових середовищах. Пристрій використовується для моніторингу роботи машин і обладнання, виявлення будь-яких аномалій або дефектів у машинах і діагностики потенційних проблем до того, як вони призведуть до дорогого простою або поломки обладнання.

Крім промислового застосування, Spectramag-6 також використовується в моніторингу навколишнього середовища для вимірювання та аналізу магнітних полів і вібрацій, спричинених природними явищами, такими як землетруси, вулканічна активність і геомагнітні бурі.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Загалом Spectramag-6 є потужним і універсальним інструментом, який використовується в широкому діапазоні програм для виявлення, вимірювання та аналізу магнітних полів і вібрацій. Він забезпечує спектральний аналіз виміряних сигналів у реальному часі, дозволяючи користувачам швидко виявляти й аналізувати будь-які аномалії чи закономірності в даних і приймати обґрунтовані рішення на основі результатів [11].

#### 1.3.4 Спеціалізовані системи

На додаток до систем, про які я згадував раніше, існують також спеціалізовані системи для вимірювання магнітного поля об'єктів, що рухаються, у спеціальних додатках. Ось кілька прикладів:

**SQUID-магнітометри:** це високочутливі магнітометри, які використовують надпровідні квантові інтерференційні пристрої (SQUID) для виявлення змін у магнітному полі. Магнітометри SQUID тип магнітометра, який вимірює надзвичайно малі зміни магнітних полів. Вони зазвичай використовуються в таких програмах, як медична візуалізація та геологічна зйомка. Одним із прикладів системи магнітометра SQUID є Quantum Design MPMS-3S [12].



Рисунок 1.14 – Quantum Design MPMS-3S

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Камери магнітного поля: це системи візуалізації, які використовують масив магнітних датчиків для створення двомірного зображення магнітного поля. Вони зазвичай використовуються в наукових дослідженнях, характеристиках матеріалів і візуалізації магнітного поля.

Системи магнітного кодера: у цих системах використовуються магнітні датчики для вимірювання положення та швидкості об'єктів, що обертаються або лінійно рухаються. Системи магнітного кодера зазвичай використовуються в програмах керування рухом, наприклад у робототехніці, верстатах з ЧПК та автоматизованих складальних лініях.

Системи магнітно-порошкового контролю: ці системи використовують магнітні поля для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів у металевих об'єктах, таких як тріщини, порожнечі та вклучення. Системи магнітно-порошкового контролю зазвичай використовуються в неруйнівному контролі аерокосмічних компонентів, автомобільних деталей і промислового обладнання.

Системи магнітно-резонансної томографії (МРТ): як я вже згадував раніше, системи МРТ використовують потужні магнітні поля для створення детальних зображень внутрішніх структур тіла. Системи МРТ широко використовуються в медичній діагностиці, зокрема для виявлення аномалій головного мозку, хребта та суглобів.

Датчики магнітного поля для носіїв: тип датчика, який може вимірювати магнітне поле біля тіла, який можна використовувати для моніторингу стану здоров'я, відстеження фізичної форми та розпізнавання жестів. Вони зазвичай використовуються в розумних годинниках, фітнес-трекерах та інших переносних пристроях.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Матриці магнітометрів: тип матриці датчиків, яка може вимірювати магнітне поле в кількох напрямках. Вони зазвичай використовуються в геофізичних дослідженнях, екологічному моніторингу та військових застосуваннях. Одним із прикладів матричної системи магнітометрів є Geometrics G-858 MagMapper [13].



Рисунок 1.15 – Geometrics G-858 MagMapper

Останнім часом з'явилися також нові технології вимірювання параметрів магнітного поля, такі як магнітна інтерференція, магнітооптичні методи та інші. Ці технології дозволяють отримувати більш точні та швидкі результати вимірювань.

Ці спеціалізовані системи демонструють універсальність і важливість вимірювань магнітного поля в різних областях, від медичної діагностики до транспортування. Оскільки технологія продовжує розвиватися, ми можемо очікувати ще більше інноваційних застосувань вимірювання магнітного поля в майбутньому.

Узагалі, системи вимірювання параметрів магнітного поля об'єктів в русі є дуже різноманітними та залежать від конкретних потреб та вимог до точності вимірювань.

## Висновок до розділу 1

Було розглянуто магнітне поле, його основні характеристики і їх способи вимірювання. Були розглянуті види об'єктів та явищ, що стають джерелами магнітного поля. Їх можна аналізувати і моделювати у вигляді джерел магнітного поля магнітного диполя. Також були розглянуті вже існуючі системи вимірювання параметрів магнітного поля в тому числі і рухомого об'єкту.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

## 2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО РІШЕННЯ

Дивлячись на попередній розділ для створення системи вимірювання магнітного поля потрібно розробити прилад, що буде вимірювати значення магнітної індукції і надавати їх у вигляді коду персональному комп'ютеру.

Для цього необхідно вибрати первинний вимірювальний перетворювач. Найбільш перспективним вибором є магніторезистивні давачі (датчики, сенсори). Магніторезистивні давачі є одними з найбільш точних та надійних датчиків, що використовуються в різних пристроях. Їх можна використовувати в багатьох різних додатках, таких як вимірювання кута, прискорення, магнітного поля, відстані та інших параметрів. Магніторезистивні датчики - це тип датчиків, які використовують зміну опору магнітного матеріалу при зміні магнітного поля. Ці датчики зазвичай виготовляються зі сплавів, що містять залізо, нікель, кобальт та інші магнітні матеріали. Основна причина обрання магніторезистивних датчиків полягає в їх високій точності та швидкості реакції. Вони можуть вимірювати зміну магнітного поля з точністю до 1/1000 частини від максимального значення. Крім того, магніторезистивні датчики є дуже швидкими, і їх відповідь може бути дуже швидко зчитана з частотою до кількох кілогерц. Іншою важливою перевагою магніторезистивних датчиків є їх маленький розмір та мала вага. Це дозволяє легко і зручно вбудовувати їх в необхідні пристрої. Крім того, магніторезистивні датчики мають досить мале енергоспоживання, так що вони можуть бути використані в різних ситуаціях, де доступ до джерела енергії може бути обмеженим. Загалом, магніторезистивні датчики мають великий потенціал для використання в різних сферах, і їх обрання обґрунтовано високою точністю, швидкістю реакції та маленьким розміром.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Найпоширенішими магніторезистивними давачами на ринку є мікросхеми компанії Honeywell серії HMC10XX [14]. Магнітні датчики Honeywell HMC1001 і HMC1002 - це одно- і двовісні датчики для поверхневого монтажу, призначені для магнітного зондування в слабких полях. Доповнюючи їх функціями обробки сигналу, можна отримати економічно ефективні магнітометричні та компасні рішення. Ці невеликі, недорогі рішення легко монтуються для великих об'ємів малогабаритних пристроїв. Датчики HMC1001 і HMC1002 застосовуються в компасах, навігаційних системах, магнітометрії. В датчиках HMC1001 і HMC1002 використовується анізотропна магніторезистивна (AMR) технологія Honeywell, яка забезпечує переваги над магнітними датчиками на основі котушок. Це надзвичайно чутливі твердотільні магнітні датчики, призначені для вимірювання напрямку і величини магнітних полів Землі або інших джерел магнітного поля від десятків мікрогаусів до 6 гаусів. Магнітні датчики Honeywell є одними з найчутливіших і найнадійніших високочутливих датчиків в галузі. Особливостями та перевагами є:

Широкий діапазон індукції поля: Діапазон індукції магнітного поля до  $\pm 6$  гаус, (поле землі = 0,5 гаус)

Невеликий розмір: Призначений для спільної роботи з 1- та 2-координатними датчиками для забезпечення 3-координатного (x, y, z) зондування (10x5x3 мм)

Корпус: 1-осьова частина в 8-контактному SIP, 8-контактному SOIC або керамічному 8-контактному DIP корпусі та 2-осьова частина в 16-контактному або 20-контактному корпусі SOIC

Твердотільні: Ці невеликі пристрої зменшують витрати на складання плат, підвищують надійність і міцність порівняно з механічними флюсовими затворами.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Котушки на кристалі: Запатентовані котушки для встановлення/скидання на кристалі для зменшення впливу температурного дрейфу, похибок нелінійності та втрати вихідного сигналу через наявність високих магнітних полів. Запатентовані стрічки зміщення на кристалі для усунення впливу спотворень, спричинених твердим залізом

Економічна ефективність: Датчики були спеціально розроблені, щоб бути доступними за ціною для великих об'ємів OEM-продукції.

Ці схеми працюють від 5 В і мають діапазон вихідної напруги до 330 mV. Щоб використати отриманні значення з цих датчиків на АЦП потрібен вторинний вимірювальний перетворювач типу підсилювача. Доступними на ринку підсилювачами є мікросхеми компанії Analog Devices. Для опрацювання сигналів з датчиків серії НМС10хх потрібен диференційний вхід тому вторинним вимірювальним перетворювачем повинен бути інструментальний підсилювач. Для цього можна використати мікросхему AD8422. Особливостями цієї мікросхеми є [15]:

Низьке енергоспоживання: 330 мкА максимальний струм спокою.

Вихід "рейка на рейку.

Низький рівень шуму і спотворень.

8 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$  максимальний шум вхідної напруги при 1 кГц0.

15 кВ р-р RTI шум ( $G = 100$ ).

0,5 ppm нелінійність з навантаженням 2 кОм ( $G = 1$ ).

Відмінні характеристики змінного струму.

Мінімальний коефіцієнт гармонік 80 дБ на частоті 7 кГц ( $G=1$ ).

Смуга пропускання 2,2 МГц ( $G = 1$ ).

Високоточні характеристики постійного струму (AD8422BRZ).

150 дБ мінімальний CMRR ( $G = 1000$ ).

0,04% максимальна похибка посилення ( $G = 1000$ ).

0,3 мкВ/°C максимальний дрейф напруги вхідного зсуву.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

0,5 нА максимальний вхідний струм зсуву.

Широкий діапазон живлення.

від 3,6 В до 36 В одиночне живлення.

Від  $\pm 1,8$  В до  $\pm 18$  В подвійне живлення.

Захист від перенапруги на вході: 40 В.

Діапазон підсилення: від 1 до 1000.

Для цифрового перетворення використовується АЦП або аналогово-цифровий перетворювач. Він є частиною мікроконтролера (МК). Наразі в Україні є досить поширене використання мікросхем компанії ST Microelectronics серії STM32F207XX. Особливостями серії цих МК є [16]:

Ядро: 32-розрядний процесор ARM Cortex™-M3 з адаптивним прискорювачем реального часу (ART Accelerator™), що дозволяє виконувати операції з нульовим станом очікування з флеш-пам'яті, частота до 120 МГц, блок захисту пам'яті, 150 DMIPS/1,25 DMIPS/МГц (Dhrystone 2.1)

Пам'ять: До 1 Мбайт флеш-пам'яті; 512 байт OTP-пам'яті; до 128 + 4 Кбайт SRAM; Гнучкий статичний контролер пам'яті, що підтримує пам'ять Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR і NAND; паралельний інтерфейс LCD, режими 8080/6800

Керування синхронізацією, скиданням і живленням: Від 1,65 до 3,6 В живлення та входи/виходи; POR, PDR, PVD і BOR; кварцовий генератор від 4 до 26 МГц; внутрішній заводський RC з частотою 16 МГц (точність 1% при 25 °С); генератор 32 кГц для RTC з калібруванням; внутрішній RC з частотою 32 кГц з калібруванням

Низьке енергоспоживання: сплячий режим, режими зупинки та очікування; VBAT живлення для RTC; резервні регістри 20 × 32 біт та додаткова резервна SRAM на 4 КБ

3 × 12-розрядні, 0,5 мкс АЦП: до 24 каналів та до 6 MSPS в режимі потрійного чергування

2 × 12-розрядні ЦАП

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

DMA загального призначення: 16-потоківий контролер DMA з централізованим FIFO та підтримкою пакетів

До 17 таймерів: До дванадцяти 16-розрядних і двох 32-розрядних таймерів, до 120 МГц, кожен з яких має до 4 IC/OC/PWM або лічильник імпульсів і вхід для квадратурного (інкрементного) енкодера

Режим налагодження: налагодження послідовного проводу (SWD) та інтерфейси JTAG та вбудована трасувальна макрокомірка Cortex-M3 Macrocell™

До 140 портів вводу/виводу з можливістю переривання з яких: до 136 швидких портів вводу/виводу до 60 МГц і до 138 портів вводу/виводу, стійких до напруги 5 В

До 15 інтерфейсів зв'язку: 3 інтерфейси I2C (SMBus/PMBus); 4 USART і 2 UART (7,5 Мбіт/с, інтерфейс ISO 7816, LIN, IrDA, управління модемом); 3 SPI (30 Мбіт/с), 2 з мікшованим I2S для досягнення точності аудіо класу за допомогою аудіо PLL або зовнішнього PLL; 2 інтерфейси CAN (2.0B Active); інтерфейс SDIO

Одиниця обчислення CRC, 96-бітний унікальний ідентифікатор  
Аналоговий генератор істинних випадкових чисел

Кінцевим завданням цього приладу є надання даних персональному комп'ютеру (ПК). Використовуючи комп'ютер ми можемо графічно відобразити отримані дані, опрацювати їх або зберегти. В сучасному світі комп'ютери майже всі підтримують однакові інтерфейси, через що вид або модель комп'ютера не має різниці. Щоб зчитувати інформацію з мікроконтролера використовується інтерфейс ПК RS-232. Він не підтримується мікроконтролерами, тому буде використана мікросхема перетворення інтерфейсів. Зі сторони мікроконтролера використано інтерфейс USART. Для цього можна використати мікросхему MAX232 компанії MAXIM. Її особливостями є живлення від +3,0 В до +5,5 В, швидкість до 1 Мбіт/с та економічна доступність [17].

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновок до 2 розділу

В даному розділі обрано та обґрунтовано основні елементи автоматизованої системи вимірювання характеристик магнітного поля рухомого об'єкту. На обрані елементи були наведені та обґрунтовані існуючі мікросхеми різних компаній. Такими мікросхемами є магніторезистивні давачі компанії Honeywell серії HMC10XX, інструментальні підсилювачі компанії Analog Devices, мікроконтролер компанії ST Microelectronics серії STM32F207XX та перетворювач інтерфейсів компанії MAXIM MAX232. Через поширеність підтримки інтерфейсу RS-232, компанія або модель персонального комп'ютера не впливає.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

### 3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

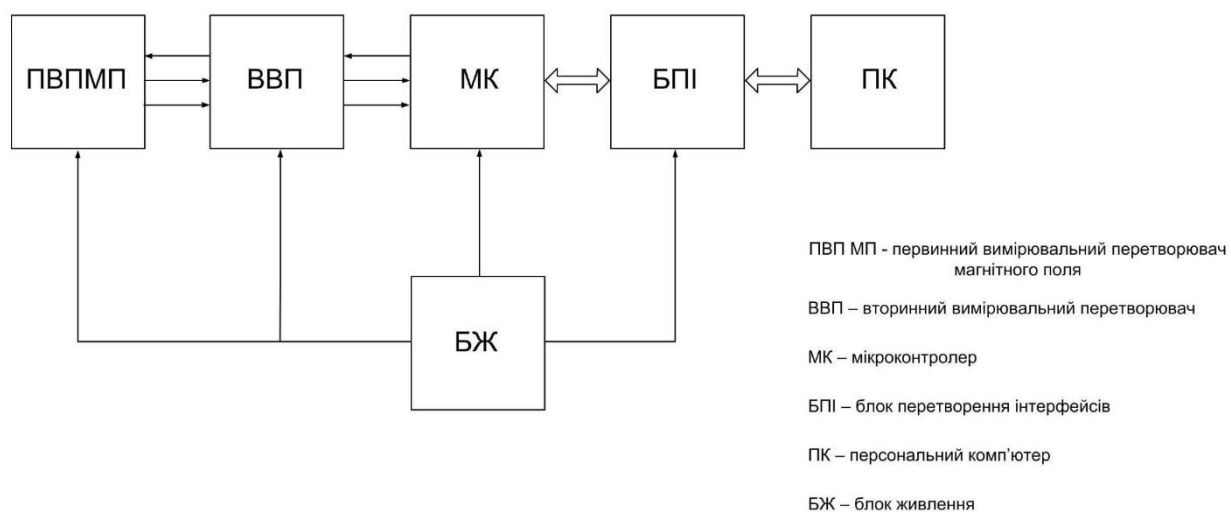


Рисунок 3.1 – Схема електрична структурна

Первинний вимірювальний перетворювач магнітного поля (ПВП МП). Блок первинних вимірювальних перетворювачів (також відомий як блок датчиків або модуль датчиків) є компонентом системи вимірювання, який містить кілька первинних датчиків, призначених для вимірювання різних параметрів. Цей блок зазвичай використовується для збору даних з декількох датчиків і передачі цих даних до подальшої обробки або системи контролю. Цей блок складається з трьох магніторезистивних датчиків для вимірювання магнітного поля.

Вторинний вимірювальний перетворювач (ВВП). Вторинні вимірювальні перетворювачі (або вторинні датчики) є пристроями, які отримують сигнали від первинних датчиків і перетворюють їх на зручні для подальшого використання вимірювальні сигнали. Вони виконують функцію обробки, підсилення, фільтрації або конвертації сигналів для забезпечення точності, стабільності та сумісності з іншими пристроями або системами. Основною функцією вторинних вимірювальних перетворювачів є перетворення інформації, що видається первинними перетворювачами, в напругу, що подається на АЦП. Деякі сигнали, що надходять від первинних датчиків, можуть бути дуже слабкими.

Вторинний перетворювач може містити вбудований підсилювач, який збільшує амплітуду сигналу для поліпшення його сприйняття іншими пристроями.

Мікроконтролер (МК). Мікроконтролер являє собою блок збору і обробки інформації. Основна функція мікроконтролера полягає в керуванні і обробці даних, забезпеченні комунікації з іншими пристроями та виконанні заданих алгоритмів. Також він може виступати як пам'ять, де можливо зберігати виміряні значення. Він може мати вбудовані периферійні пристрої, такі як АЦП (аналого-цифровий перетворювач), ШІМ (широтно-імпульсна модуляція), UART (універсальний асинхронний приймач-передавач) та інші вбудовані прилади та інтерфейси.

Блок перетворення інтерфейсів (БПІ). Блок перетворення інтерфейсних сигналів є компонентом системи, який забезпечує взаємодію між різними пристроями або компонентами, які використовують різні інтерфейси передачі даних. Його основна функція полягає в перетворенні сигналів з одного інтерфейсу на інший для забезпечення сумісності та передачі даних між різними пристроями. Ці інтерфейсні пристрої забезпечують фізичне підключення та комунікацію між двома різними інтерфейсами. Наприклад, пристрій для перетворення сигналів з аналогового на цифровий або з USB на RS-232. Блок перетворення інтерфейсних сигналів може включати пристрої або компоненти, які забезпечують протоколи комунікації між пристроями. Наприклад, UART, SPI, I2C, Ethernet, CAN тощо.

Персональний комп'ютер (ПК). Персональний комп'ютер розглянутий як кінцевий блок структурної схеми, він може бути використаний для графічного зображення, виконання кінцевих розрахунків або зберігання даних для подальшого використання. Також комп'ютер використовується для керування мікроконтролера.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		40

Блок живлення (БЖ). Блок живлення, як блок структурної схеми, відображає компонент, відповідальний за постачання електричної енергії для різних елементів системи. Він забезпечує стабільне та надійне живлення всіх інших компонентів системи. Блок живлення може мати одне або декілька джерел живлення. І матиме декілька різних значення напруги на виході для живлення різних елементів схеми. Залежачи від функціоналу і будови мікросхеми мають свої номінали живлення. В цій схемі живлення потребують ПВП, ВВП, МК та БП.

#### Висновок до 3 розділу

В даному розділі розроблено структурну схему автоматизованої системи вимірювання характеристик магнітного поля рухомого об'єкту. Вона складається з: первинні вимірювальні перетворювачі, вторинні вимірювальні перетворювачі, мікроконтролер, блок перетворення інтерфейсів, персональний комп'ютер, блок живлення.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 РОЗРОБКА ФУНКЦІЙНОЇ СХЕМИ

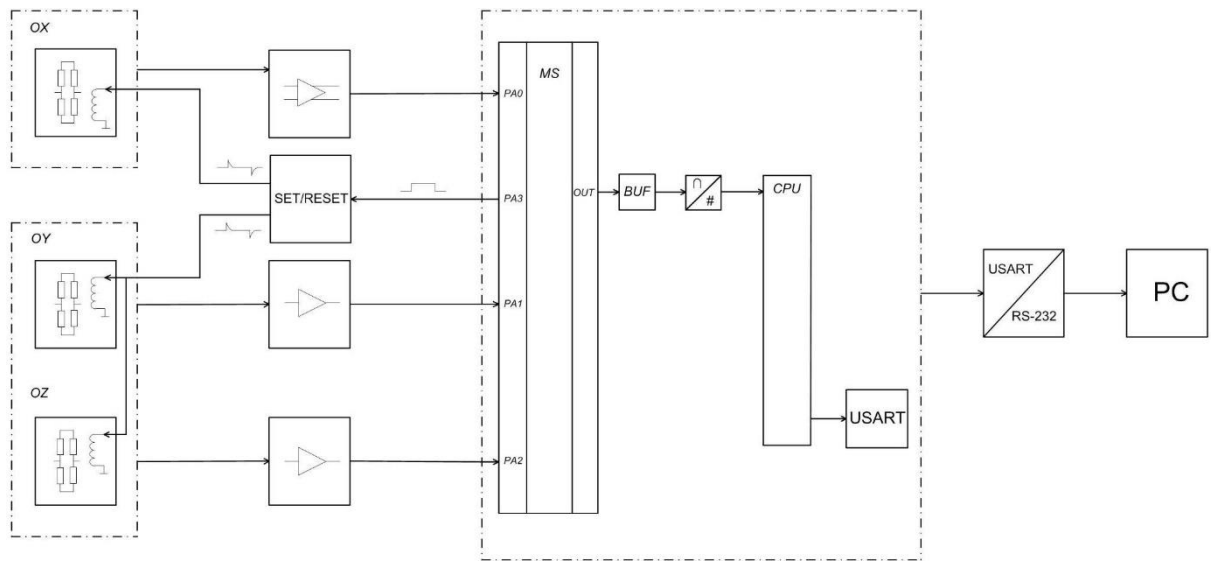


Рисунок 4.1 – Схема електрична функційна

В основі роботи автоматизованої системи вимірювання характеристик магнітного поля рухомого об'єкту стоїть первинний вимірювальний перетворювач. Цей давач використовує магніторезистивні елементи моста Вітстона для вимірювання зміни опору в результаті впливу магнітного поля. Принцип дії полягає в зміні опору магніторезистивного елемента при зміні магнітного поля, що відбувається через ефект магніторезистивності. Мост Вітстона - це електрична схема, що складається з чотирьох опорів, утворюючи міст, який може бути збалансований. Коли міст збалансований, потенціал на виході моста дорівнює нулю. Якщо на магніторезистивних елементах відсутнє магнітне поле, вони мають однаковий опір і міст збалансований. Однак, якщо впливає магнітне поле, опір магніторезистивних елементів змінюється. Зміна опору при зміні магнітного поля призводить до незбалансування моста. Це створює ненульовий потенціал на виході моста, який може бути виміряний і проаналізований. Збалансованість моста полягає в тому, що магніторезистивні елементи складаються з магнітних доменів, які в момент коли на них не діє магнітне поле направлені в однаковий напрямок. Кожен з чотирьох елементів направлений в свою сторону, балансує один одного, тим самим створюючи на виході нульовий потенціал.

Коли магнітні домени потрапляють під магнітне поле кожен домен переходять у хаотичний напрям, що призводить до ненульового потенціалу. Щоб ним користуватися спочатку необхідно привести магнітні домени в хаотичний стан (скинути), використовуючи схему встановлення та скидання, пославши на неї імпульс. З коротким часом магнітні домени приймають відповідний напрямок, що відповідає магнітному полю, що впливає на них. Отриманий потенціал буде діапазоном до 330 mV. Для використання аналого-цифрового перетворювача потрібні значення діапазоном 0 - 3.0 В. Щоб отримати такі значення використано вторинний вимірювальний перетворювач. Інструментальний підсилювач буде підсилювати отримані дані з давача і передавати їх мікроконтролеру. В мікроконтролері через мультиплекс вони будуть надходити на АЦП. Після їх конвертації та обробки, використовуючи ресурси та внутрішню пам'ять мікроконтролера, вони будуть надані персональному комп'ютеру. Для цього використовують інтерфейси. Інтерфейсом мікроконтролера є USART. USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter) - це інтерфейс передачі даних, який використовується для забезпечення комунікації між мікроконтролерами або мікропроцесорами та зовнішніми пристроями, такими як датчики, дисплеї, модеми і т. д. Він буде працювати в асинхронному режимі. У асинхронному режимі передачі дані передаються без синхронізації за допомогою окремої лінії годинника. Використовується одна лінія для передачі даних (TX) та одна лінія для прийому даних (RX). Інтерфейсом персонального комп'ютера є RS-232. RS-232 (Recommended Standard 232) - це стандартний протокол для передачі послідовних сигналів даних між пристроями через послідовний порт. Він був розроблений для забезпечення зовнішнього з'єднання комп'ютерів з пристроями, такими як модеми, принтери, сенсори, аудіо- та відеообладнання та іншими зовнішніми пристроями.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		43

RS-232 використовує асинхронний метод передачі даних, де біти передаються послідовно, один за одним, без сигналу годинника. Зазвичай використовуються дві лінії для комунікації: TX (Transmit - передача) для відправлення даних з передавача і RX (Receive - прийом) для отримання даних на приймачі. Щоб поєднати ці інтерфейси обрано MAX232. MAX232 - це інтегральна мікросхема, яка використовується для забезпечення перетворення рівнів сигналів з RS-232 на рівні сигналів звичайної логіки TTL (Transistor-Transistor Logic) і навпаки. Принцип дії MAX232 базується на використанні внутрішніх зарядних pomp, які генерують додаткові напруги, необхідні для RS-232 комунікації. Мікросхема містить чотири лінійні ступені зарядних pomp, два драйвери для передавача (TX) та два драйвери для приймача (RX).

У першому етапі мікросхема MAX232 використовує зарядну помпу для створення негативної напруги (-V) та додаткової позитивної напруги (+V), які потрібні для RS-232 сигналів. Ці напруги використовуються для відповідного перетворення рівнів сигналів. Далі, RS-232 сигнали вводяться в вхідні вузли MAX232. Драйвери передавача (TX) перетворюють логічні рівні сигналів TTL на RS-232 сигнали, які можуть бути передані на підключений пристрій з RS-232. Драйвери приймача (RX) виконують зворотну операцію, перетворюючи RS-232 сигнали на рівні сигналів TTL, які можуть бути зрозумілі для мікроконтролера або мікропроцесора. Одна мікросхема MAX232 зазвичай забезпечує двосторонню комунікацію між мікроконтролером або мікропроцесором та RS-232 пристроєм.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

#### Висновок до 4 розділу

В даному розділі описана функційна схема автоматизованої системи вимірювання характеристик магнітного поля рухомого об'єкту. Можна виділити принцип збалансованості магніторезистивних елементів мосту Вітстона. Що полягає в набутому стані магнітних доменів: однонапрвленому чи хаотичному. Щоб опрацьовувати отримані потенціали потрібні інструментальні підсилювачі. А для зв'язку з периферією потрібні інтерфейси USART та RS-232.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		45



Прийнято, що джерело живлення ззовні. Воно буде надходити до приладу через роз'єм моделі MOLEX 22-23-2021. На схемі воно зображене, як зміна напруга 27 В. Для зручності створено дві постійні напруги +27 В та -27 В. Це зроблено завдяки діодному мосту. В схемі використано чотири діоди моделі DIODE-DO214AC. Принцип дії діодного мосту в направленості діодів. Для стабілізації живлення використаємо поляризований конденсатор на 100 mkF \* 50 В моделі CPOLEU140CLH-1010 (CPOLEU) і два конденсатора на 1 mkF і 140 pF моделей CC0603 (C). Далі отриману напругу перетворено на +12 В та -12 В. Це зроблено перетворювачем струму TES3-1223 компанії Traco power. Отримана напруга потрібна для живлення інструментальних підсилювачів. З +12 В отримано напругу +5 В. Така живлення підходить для 5В-мікросхем, а саме для перетворювача інтерфейсів, давачів магнітного поля та операційних підсилювачів з однополярним живленням. Для цього використано мікросхему LM2576-5.0. Це 3.0 А, 5 В, понижуючий імпульсний регулятор [18]. Серія регуляторів LM2576 — це монолітні інтегральні схеми, які ідеально підходять для простого та зручного проектування понижувального перемикаючого регулятора (понижувального перетворювача). Усі схеми цієї серії здатні керувати навантаженням 3,0 А з чудовим регулюванням лінії та навантаження. Ці пристрої доступні з фіксованою вихідною напругою 3,3 В, 5,0 В, 12 В, 15 В, а також з регульованою вихідною напругою. Ці регулятори були розроблені, щоб мінімізувати кількість зовнішніх компонентів для спрощення конструкції джерела живлення. Для подальшої стабілізації живлення використано два конденсатора на 1 mkF і 140 pF. Моделі конденсаторів CC0603 (C). Також для захисту наступних менш потужних схем використано котушку індуктивності моделі DR73 і діод 1N5908. Для живлення мікроконтролера створено напругу +3,3 В. Використано мікросхему LP2950Z (LP2950) з характеристиками 100 мА, 30 В. LP2950Z - це мікросхема стабілізатора напруги з низьким випадковим вихідним шумом.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

. Вона забезпечує стабільний вихідний струм та напругу на виході блоку живлення, що є необхідним для нормальної роботи електронних пристроїв. LP2950Z має високу точність вихідної напруги та може працювати в широкому діапазоні вхідних напруг. Щоб стабілізувати отримане живлення використано два конденсатора на 1 мкF і 140 pF. Моделі конденсаторів CC0603 (C). Отриману напругу +3,3 В ізольовано резистором 2 Ом. Модель резистора R-EU\_R0603 (R-EU\_). Це зроблено для мінімізації впливу імпульсів мікроконтролера на інші мікросхеми [19].

Завдання приладу вимірювати магнітне поле рухомого об'єкту. Це представлено у вигляді системи що фіксує значення магнітної індукції за трьох осях (oX, oY, oZ). Для цього використано одновісну мікросхему HMC1001, що представляє собою вісь X, та двохвісну мікросхему HMC1002, для вісі Y і Z. Живлення давачів +5 В.

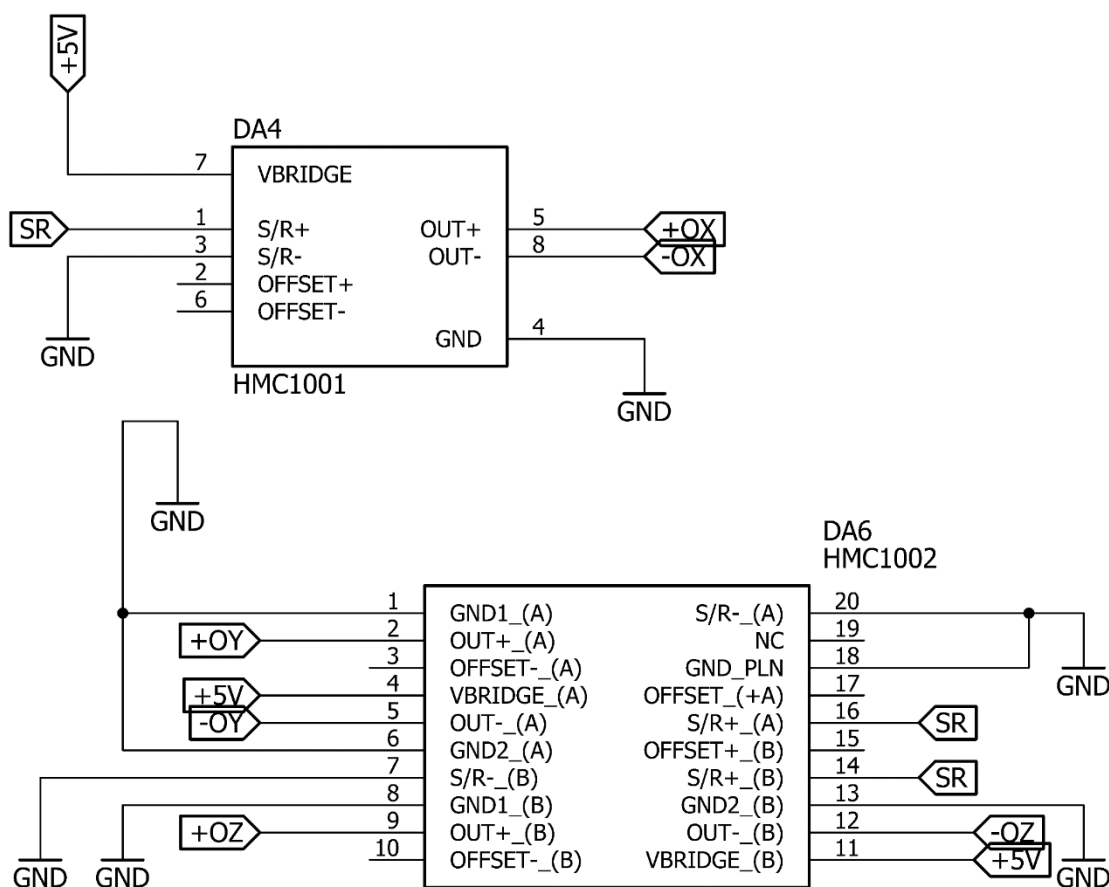


Рисунок 5.3 – Первинний вимірювальний перетворювач

Через описаний в минулому розділі принцип роботи давачів серії НМС10ХХ, розроблено схему встановлення та скидання. Потрібно отримати імпульс в 12 В.

Вона буде починатися з імпульсу, що генерує мікроконтролер напругою 2.5 В. Для цього використано пін РА3. Далі його підсилено до 5В операційним підсилювачем з однополювним живленням AD8656R (AD8656). Живленням підсилювача +5В і коефіцієнт підсилення в 2 рази [20].

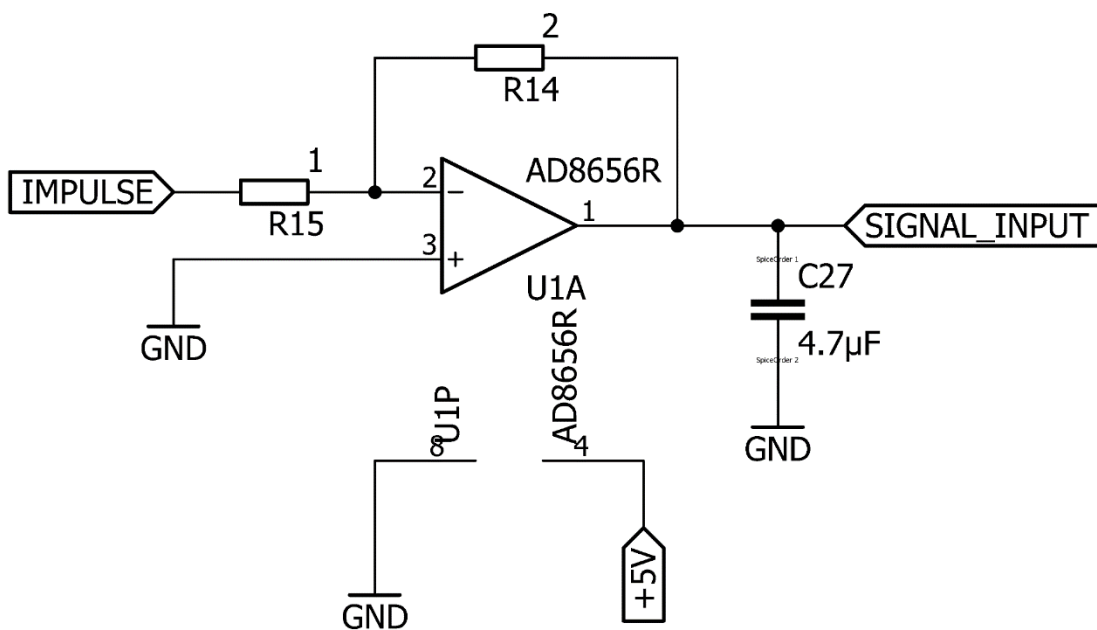


Рисунок 5.4 – Підсилення сигналу з 2,5 В до 5 В

Далі отриманий імпульс підвищено до 12 В, використовуючи мікросхему МАХ662А. Маючи квадратний імпульс + 12 В, потрібно проінтегрувати його в імпульс +12 В та -12 В.



Рисунок 5.5 – Квадратний імпульс +12 В

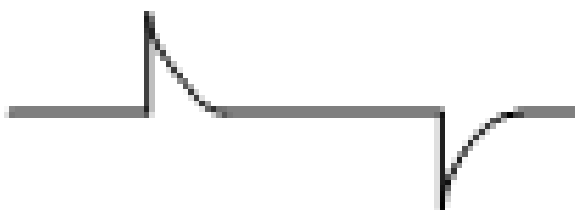


Рисунок 5.6 – Проінтегрований імпульс +12 В і -12 В





Отримані потенціали, що були посилені до діапазону в 3,0 В, надходять на мікроконтролер STM32F207VCT. Його конфігурація LQFP100. Він має 100 ніжок. Для забезпечення працездатності мікроконтролера приєднано ізольоване живлення +3,3 В, виведено землю через два конденсатори на 4.4  $\mu$ F моделі CC0603 (C), і під'єднаємо два кристали моделі CRYSTAL HC49S (CRYSTAL) на 25000 і 36768k. Оба кристали по своєму з'єднані до мікроконтролера через резистор моделі R-EU\_R0603 (R-EU\_) на 10 МОм і два конденсатора моделі CC0603 (C) на 10 pF і 6 pF відповідно. При цьому будуть використані піни: для живлення +3,3 В: 6(VBAT), 11, 19, 20(VDDA), 21(VREF+), 28, 50, 75, 100; для виводу землі(GND): 10, 27, 49(VCAP1 з використанням конденсатора 4.4  $\mu$ F), 73(VCAP2 з використанням конденсатора 4.4  $\mu$ F), 74; для підключення кристалу на 25000: 12(OSC\_IN), 13(OSC\_OUT); для підключення кристалу на 36768 k: 8(PC14), 9(PC15). В мікроконтролері використано піни 23(PA0 - WKUP), 24(PA1), 25(PA2). Вони відповідно порядку пітримують за ADC123\_IN0/WKUP, ADC123\_IN1, ADC123\_IN2. Для створення імпульсу, що буде скидати давачі, використано пін 26(PA3). Щоб передати оброблену інформацію через інтерфейс вибрано піни 68(PA9), що підтримує USART1\_TX, та 69(PA10), що підтримує USART1\_RX.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

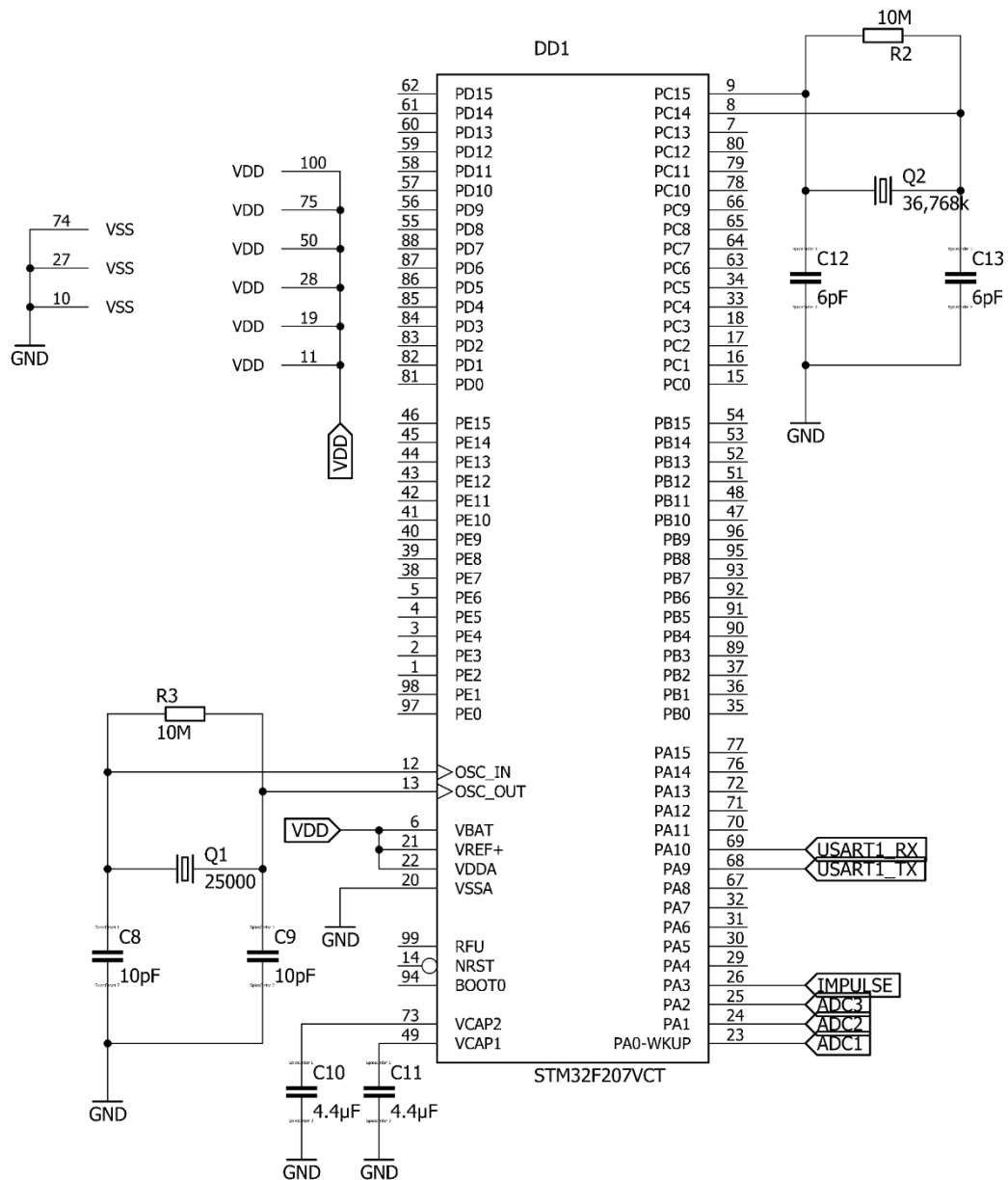


Рисунок 5.10 – Мікроконтролер STM32F207VCT

Інтерфейс USART приєднано до мікросхеми MAX232, що буде перетворювати на інтерфейс RS-232. Для живлення обрано +5 В. Для підключення живлення, виводу землі і налаштування мікросхеми будуть використані конденсатори на 1  $\mu\text{F}$  моделі CC060 (C) і резистори на 4.7k моделі R-EU\_R0603 (R-EU\_). MAX232 - це інтегральна мікросхема, яка використовується для перетворення рівнів логічних сигналів, що використовуються в комп'ютерах та інших електронних пристроях, в сигнали з високим рівнем напруги, які необхідні для передачі даних по дротових лініях зв'язку.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



### Висновок до 5 розділу

В даному розділі розроблено електричну принципову схему автоматизованої системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту. Описано використані елементи при створенні схеми, принципи взаємодії між собою мікросхем, їх спосіб з'єднання, використані піни мікроконтролера і задачі, що покладені на них.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		55

## 6 РІВНЯННЯ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ

### 6.1 Рівняння функції перетворення

Складено рівняння функції перетворення:

$$N = F(K_{\text{МД}}; K_{\text{ІП}}; K_{\text{АЦП}}) \quad (1)$$

де  $K_{\text{МД}}$  – коефіцієнт перетворення давача магнітного поля;  $K_{\text{ІП}}$  – коефіцієнт перетворення інструментального підсилювача;  $K_{\text{АЦП}}$  – коефіцієнт перетворення АЦП.

Отримано вираз (2):

$$N = K_{\text{МД}} \cdot K_{\text{ІП}} \cdot K_{\text{АЦП}} \quad (2)$$

Коефіцієнтом перетворення давача магнітного поля є відношення вихідної напруги до номінального значення індукції магнітного поля:

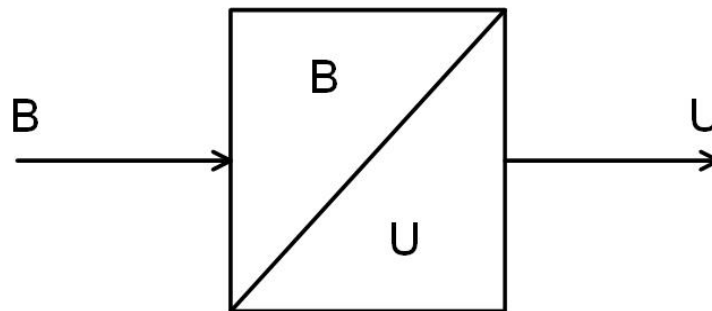


Рисунок 6.1 – Давач магнітного поля

$$K_{\text{МД}} = \frac{U_{\text{ВІХН}}}{B_{\text{Н}}} \quad (3)$$

Номінальним значенням магнітної індукції давачів серії НМС100Х за технічною специфікацією є 2 гауси або 0,0002 Тс [14].

$$B_{\text{Н}} = 2 \text{ Гаусс}$$

Значенням вихідної напруги є добуток чутливості давача, опорної напруги давача та номінального значення магнітної індукції. Отримано вираз (4):

$$U_{\text{ВІХ}} = \alpha \cdot U_{\text{ОПР}} \cdot B_{\text{Н}} \quad (4)$$

де  $\alpha$  – чутливість давача магнітного поля;  $U_{\text{ОПР}}$  – опорна напруга давача;  $B_{\text{Н}}$  – номінальне значення індукції магнітного поля.



Значення коду сформовано рівнянням відношення добутку вхідної напруги та кількості розрядів на опорну напругу АЦП. Якщо не встановлювати зовнішню опорну напругу для мікроконтролера, значенням опорної напруги АЦП буде живлення мікроконтролера, що дорівнює 3,3В. За технічною специфікацією АЦП мікроконтролерів серії STM32F207 має 12 розрядів [16]. Використано 11 розрядів. 12 розряд відповідає за знак. Маємо рівняння коду (9):

$$N = \frac{U_{\text{вх}} \cdot 2^{11}}{U_{\text{ОПР АЦП}}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot 2^{11}}{3,3\text{В}} \quad (9)$$

Підставивши номінальні значення отримано максимально допустиме значення коду (11). Номінальним вхідним значенням є добуток вихідного значення напруги та коефіцієнта підсилення.

$$U_{\text{вхн}} = U_{\text{вих}} \cdot K_{\text{ІП}} = (33 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 2)\text{В} \cdot 10 = 3.3\text{В} \quad (10)$$

$$N_{\text{н}} = \frac{U_{\text{вхн}} \cdot 2^{11}}{U_{\text{ОПР АЦП}}} = \frac{3,3\text{В} \cdot 2^{11}}{3,3\text{В}} = 111\ 1111\ 1111 \quad (11)$$

Коефіцієнтом перетворення АЦП є відношення вихідного коду до вхідної напруги, що характеризує аналоговий сигнал.

$$K_{\text{АЦП}} = \frac{N_{\text{х}}}{U_{\text{вх}}} \quad (12)$$

Підставивши номінальні значення в рівняння (12) одержано вираз (13):

$$K_{\text{АЦП}} = \frac{N_{\text{н}}}{U_{\text{вхн}}} = \left( \frac{2^{11}}{3,3} \right) \frac{1}{\text{В}} \quad (13)$$

Рівняння функції перетворення перевірено, підставивши отримані коефіцієнти в рівняння (2), отримавши вираз (14), розв'язком якого є максимальне допустиме значення коду  $2^{11}$ .

$$N = B \cdot K_{\text{МД}} \cdot K_{\text{ІП}} \cdot K_{\text{АЦП}} = 2\text{Гаусс} \cdot (33 \cdot 10^{-3} \cdot 5) \frac{\text{В}}{\text{Гаусс}} \cdot 10 \cdot \left( \frac{2^{11}}{3,3} \right) \frac{1}{\text{В}} = \frac{3,3 \cdot 2^{11}}{3,3} = 2^{11} \quad (14)$$

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

## 6.2 Аналіз невизначеності результатів вимірювання

Визначити невизначеність результатів давача магнітного поля є неможливим, бо в доступній технічній специфікації є лише нестохастичні значення похибок [14]. Замість цього проведений аналіз оцінки мультиплікативної та адитивної похибки і приведено кінцеве рівняння їх впливу на формування коду.

Складено аналіз оцінки мультиплікативної похибки. Вона є сумою оцінок мультиплікативних похибок давача магнітного поля, інструментального підсилювача та аналого-цифрового перетворювача.

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{МД}} + \gamma_{\text{ІП}} + \gamma_{\text{АЦП}} \quad (15)$$

Оцінка мультиплікативної похибки магнітного давача характеризується лінійною похибкою, що за технічною специфікацією [14] при номінальному значенні індукції магнітного поля 2 Гаусс при живленні 5 В дорівнює 1%.

$$\gamma_{\text{МД}} = 1\%$$

Оцінка мультиплікативної похибки інструментального підсилювача є різницею похибок резисторів, де знак обирається в більшу сторону.

$$\gamma_{\text{ІП}} = \gamma_{R_{18}} - \gamma_{R_4} = 0,5\% \pm 0,5\% = 1\%$$

Оцінка мультиплікативної похибки АЦП що за технічною специфікацією [16] складає 1%.

$$\gamma_{\text{АЦП}} = 1\%.$$

Підставивши значення в рівняння (15), отримано загальну мультиплікативну похибку, що дорівнює 3%.

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{МД}} + \gamma_{\text{ІП}} + \gamma_{\text{АЦП}} = 1\% + 1\% + 1\% = 3\% \quad (16)$$

Складено аналіз оцінки адитивної похибки. Вона є сумою стохастичних і нестохастичних похибок давача магнітного поля, інструментального підсилювача та аналого-цифрового перетворювача.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нестохастичну похибку інструментального підсилювача характеризує значення зміщеної напруги. За технічною специфікацією діапазон зміщеної напруги становить до  $60 \mu\text{В}$  [15].

$$\Delta_{\text{нестох. ІП}} = 60 \mu\text{В}$$

Нестохастичну похибку АЦП характеризує половина одиниці молодшого розряду. Одиниця молодшого розряду АЦП є відношенням опорної напруги АЦП на максимальне двійкове одинадцяти розрядне число.

$$\Delta = \frac{U_{\text{опр. АЦП}}}{2^{11}} = \frac{3,3}{2^{11}} \text{В} \quad (17)$$

$$\Delta_{\text{нестох. АЦП}} = \frac{1,65}{2^{11}} \text{В} \quad (18)$$

Підставивши значення отримано загальну адитивну похибку:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{нестох. ІП}} + \Delta_{\text{нестох. АЦП}} = 60 \mu\text{В} + \frac{1,65}{2^{11}} \text{В} = 865 \cdot 10^{-6} \text{В} \quad (20)$$

Кінцеве рівняння коду з урахуванням оцінки загальної мультиплікативної та адитивної похибки має вигляд:

$$N = B_{\text{вх}} \cdot (K_{\text{МД}} \cdot K_{\text{ІП}} \cdot K_{\text{АЦП}}) \cdot (1 + \gamma_{\Sigma}) + \Delta \cdot \Delta_{\Sigma} \quad (21)$$

Підставивши отримані значення похибок маємо рівняння (22):

$$N = B_{\text{вх}} \cdot (K_{\text{МД}} \cdot K_{\text{ІП}} \cdot K_{\text{АЦП}}) \cdot (1 + 3\%) + 0,54 \quad (22)$$

Значення відносної адитивної похибки набагато менше мультиплікативної похибки вимірювального каналу

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

## Висновок до 6 розділу

В даному розділі складено рівняння функції перетворення та проаналізовано невизначеність результатів вимірювання автоматизованої системи вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту. Було розроблено рівняння функції перетворення. Розраховані коефіцієнти давача магнітного поля, інструментального підсилювача та аналого-цифрового перетворювача. Проведено аналіз мультиплікативної та адитивної похибки. Визначено оцінку максимального значення похибки вимірювального каналу в межах 3%.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
						61
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проекту розроблено автоматизовану систему вимірювання параметрів магнітного поля рухомого об'єкту. Зроблено огляд існуючих технічних рішень, а також складових для його створення, було вибрано та обґрунтовано сучасні комплектуючі для побудови даної системи. Система дозволяє вимірювати значення індукції магнітного поля для кожного з трьох пап'ямків відносно приладу для проведення подальших метрологічних робіт.

У дипломному проєкті представлений та обґрунтований вибір структурної схеми комплексу, на її основі розроблена функційна схема. З урахуванням структурної та функційної схем, розроблена електрична принципова схема. Складено рівняння функції перетворення та проаналізовано похибки.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Коновал О. А. Основи електродинаміки. Кривий Ріг : Видавничий дім, 2008.
2. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; За заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. - К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004.
3. Essential Graduate Physics - Classical Electrodynamics (Likharev) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity\\_and\\_Magnetism/Essential\\_Graduate\\_Physics\\_Classical\\_Electrodynamics\\_\(Likharev\)/05%3A\\_Magnetism/5.04%3A\\_Magnetic\\_Dipole\\_Moment\\_and\\_Magnetic\\_Dipole\\_Media](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity_and_Magnetism/Essential_Graduate_Physics_Classical_Electrodynamics_(Likharev)/05%3A_Magnetism/5.04%3A_Magnetic_Dipole_Moment_and_Magnetic_Dipole_Media) – LibreTexts.
4. Giant magnetoresistance in magnetic nanostructures / A. Barheleny, V. Gros, J.L. Duvail [et al.] // Nanostruct. Mat. – 1995.
5. Parkin S.S.P. Giant magnetoresistance in magnetic nanostructures / S.S.P. Parkin, // Annu. Rev. Mater. Sci. – 1995.
6. Hirota E. Giant Magneto-Resistance Devices / E. Hirota, H. Sakakima, K. Inomata // N.Y.: Springer. – 2002.
7. THM1176 and TFM1186 Key Specifications // – Режим доступу: <https://www.metrolab.com/wpcontent/uploads/2020/11/THM1176TFM1186Key-specifications.pdf> – Дата доступу: 01.11.20 – Metrolab Technology SA.
8. MET-28 THM // – Режим доступу: [https://schaefertec.com/wpcontent/uploads/Metrolab\\_THM1176\\_brochure.pdf](https://schaefertec.com/wpcontent/uploads/Metrolab_THM1176_brochure.pdf) – Дата доступу: 01.09.12 – Metrolab Technology SA.
9. G-882\_Spec\_Sheet // – Режим доступу: [https://www.geometrics.com/wpcontent/uploads/2018/10/G882\\_Spec\\_Sheet.pdf](https://www.geometrics.com/wpcontent/uploads/2018/10/G882_Spec_Sheet.pdf) – Дата доступу: 01.01.18 – GEOMETRICS INC.
10. Mag-03\_DS0013 // – Режим доступу: [https://gmw.com/wpcontent/uploads/2019/02/Mag-03\\_DS0013.pdf](https://gmw.com/wpcontent/uploads/2019/02/Mag-03_DS0013.pdf) – Дата доступу: 17.01.23 – Bartington Instruments Ltd.

					ПА91.100008.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

11. Spectramag-6-OM2021-01-23-17 // – Режим доступу:  
<https://gmw.com/wp-content/uploads/2019/03/Spectramag-6-OM2021-01-23-17.pdf>  
– Дата доступу: 17.01.23 – Bartington Instruments Ltd.

12. MPMS 3 User's Manual // – Режим доступу:  
[https://www.mrl.ucsb.edu/sites/default/files/mrl\\_docs/instruments/1500100%20Rev.%20F1%20MPMS%203%20Users%20Manual.pdf](https://www.mrl.ucsb.edu/sites/default/files/mrl_docs/instruments/1500100%20Rev.%20F1%20MPMS%203%20Users%20Manual.pdf) – Дата доступу: 01.06.16 –  
Quantum Design.

13. G-858\_Spec\_Sheet // – Режим доступу:  
[https://geometrics.com/wpcontent/uploads/2018/10/G-858\\_Spec\\_Sheet.pdf](https://geometrics.com/wpcontent/uploads/2018/10/G-858_Spec_Sheet.pdf) – Дата  
доступу: 01.04.17 – GEOMETRICS INC.

14. 1-and 2-Axis Magnetic SensorsHMC1001/1002/1021/1022 // – Режим  
доступу:  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/543272/HONEYWELLACC/HMC1001.html> – Дата доступу: 01.08.08 – Honeywell International Inc.

15. AD8422 Datasheet // – Режим доступу:  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/504093/AD/AD8422.html> – Дата  
доступу: 2013 – Analog Devices, Inc.

16. STM32F207 Datasheet // – Режим доступу:  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/551708/STMICROELECTRONICS/STM32F207.html> – Дата доступу:  
14.06.11 – STMicroelectronics.

17. MAX232 Datasheet // – Режим доступу:  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/73074/MAXIM/MAX232.html> –  
Дата доступу: 01.10.03 – Maxim Integrated Products.

18. LM2576 Datasheet // – Режим доступу:  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/543767/TI1/LM2576.html> – Дата  
доступу: 01.04.13 – Texas Instruments.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. LP2950 Datasheet // – Режим доступу:  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/220589/TI/LP2950.html> – Дата  
доступу: 01.03.07 – Texas Instruments.

20. AD8656 Datasheet // – Режим доступу:  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/166970/AD/AD8656.html> – Дата  
доступу: 2005 – Analog Devices, Inc.

21. IRF7105 Datasheet // – Режим доступу:  
<https://www.snapeda.com/parts/IRF7105/Infineon%20Technologies/datasheet/> –  
Дата доступу: 18.07.03 – International Rectifier.

					<i>ПА91.100008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65