

---

МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій

## **Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи  
другого (магістерського) рівня

на тему **СПОСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКІВ  
МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЇХ ВІДПОВІДНОСТІ ВИМОГАМ ДО  
КІНЦЕВИХ ПРИСТРОЇВ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ**

Виконав: студент 2 курсу, групи ІКК-2.1  
спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

\_\_\_\_\_ Черній В. А.

Керівник \_\_\_\_\_ Горбачов В. Е.

Рецензент \_\_\_\_\_ Руссу О.П.

# ДОВІДКА

кафедри КІ та ІТ про виконану магістерську роботу

студента 2 курсу ФКПІ та КН групи ІКК-2.1

Чернія Віктора Анатолійовича

на тему Способи покращення характеристик датчиків магнітного поля для їх відповідності вимогам до кінцевих пристроїв мереж Інтернету речей

Висновок нормоконтролера Посвідчення згідно з державною роботою виконано з належним керуванням ДСТУ. Оформлено згідно вимог Бюджетного кодексу України.

Нормоконтролер к.т.н. доцент  
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

(підпис, дата)

(і. б. прізвище)

Висновок відповідального за наявність плагіату Згідно з офіційними джерелами ID 1015418051 унікальність роботи підтверджено.

Відповідальна особа к.т.н. доцент  
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

(підпис, дата)

(і. б. прізвище)

магістерської роботи

**Попередня експертиза (захист)**

(бакалаврської роботи чи магістерської роботи)

студ. Черній В. А. проведена "15" 12 2023р.

(прізвище і.б.)

Висновки Висока якість МР відповідає завдання, усі пункти виконано якісно та згідно вимог до оформлення

Оригінальність роботи! доцільність способів зменшення споживання енергії кінцевими пристроями IoT та стабілізації їх параметрів.

МР відповідає вимогам до ВКР за завданням спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія та може бути рекомендовано до захисту в ДЕК.

Члени комісії

(підпис)

к.т.н., доцент Цюпа М.Г.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

(підпис)

к.т.н. доцент Перем В.В.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

(підпис)

в.кн. каф. КІ та ІТ Швець Д.К.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

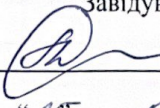


# МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій  
Освітній ступінь магістр  
Галузь знань 12 Інформаційні технології  
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІта ІТ

 к.т.н., доц. Л.Г.Йона

"25" 09 2023 року

## ЗАВДАННЯ

### НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Чернію Віктору Анатолійовичу

1. Тема роботи: «Способи покращення характеристик датчиків магнітного поля для їх відповідності вимогам до кінцевих пристроїв мереж Інтернету речей»  
керівник роботи Горбачов В. Е., к.т.н., доцент кафедри  
затверджені наказом закладу вищої освіти від 25.09.2023 р. № 1953
2. Строк подання студентом роботи 11.12.2023
3. Вихідні дані до роботи: Дослідити технології, які використовуються в IoT  
Привести результати аналізу технології датчиків магнітного поля та показати їх інтеграцію в мережі IoT
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки \_\_\_\_\_  
Розділ 1: Загальні відомості про природу магнітного поля та роботу датчиків магнітного поля  
Розділ 2: Аналіз мережі інтернету речей  
Розділ 3: Методологія покращення датчиків магнітного поля у системі інтернету речей
5. Перелік графічного матеріалу (з зазначенням обов'язкових креслень)  
Слайд 1 – Приклади візуалізації магнітних полів

Слайд 2 – Види датчиків магнітного поля

Слайд 3 - Порівняння характеристик сенсорів магнітного поля

Слайд 4 – Основні складові архітектури IoT

Слайд 5 - Шлюзи та системи збору даних


6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 25.09.2023

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	25.09.23 – 04.10.2023	<i>вск</i>
2	Розділ 1 Загальні відомості про природу магнітного поля та роботу датчиків магнітного поля	05.10.23 – 11.10.2023	<i>вск</i>
3	Розділ 2 Аналіз мережі інтернету речей	12.10.23 – 25.10.2023	<i>вск</i>
4	Розділ 3 Методологія покращення датчиків магнітного поля у системі інтернету речей	26.10.23 – 14.11.2023	<i>вск</i>
5	Висновки та рекомендації	15.11.23 – 25.11.2023	<i>вск</i>
6	Перелік джерел посилання,	26.11.23 – 08.12.2023	<i>вск</i>

Студент  В. А. Черній  
(підпис)

Керівник роботи  В. Е. Горбачов  
(підпис)



## ВІДГУК КЕРІВНИКА

на кваліфікаційну роботу другого (магістерського) рівня  
студента Чернія В. А.

на тему: Способи покращення характеристик датчиків магнітного поля для  
їх відповідності вимогам до кінцевих пристроїв мереж інтернету речей

Створення нових конструкцій ефективних кінцевих пристроїв є вкрай  
необхідним для подальшого розширення інтелектуальних мереж Інтернету речей.

Тема даної роботи присвячена дослідженню можливості використання  
магнітотранзисторів в якості датчиків магнітного поля в цифрових мережах  
«Інтернету речей». Критеріями використання є мале споживання енергії, достатня  
чутливість і стійкість до зовнішніх впливів, таких як температура та радіація.

Студент Черній В. А. добре виконав завдання до КР і основну увагу  
приділив теоретичному аналізу залежності параметрів транзисторів від магнітної  
індукції зовнішнього поля та обробці отриманих даних.

Робота проводилася значною мірою самостійно. Завдання на КР виконано.  
Необхідні для цього розрахунки проведені. При оформленні пояснювальної  
записки використовувались комп'ютерні технології.

Під час виконання магістерської роботи студент Черній В. А. провів  
розрахунки на базі теоретичної моделі, показав уміння користуватись навчальною  
та технічною літературою, ставити та розв'язувати дослідницькі задачі.

Магістерська робота відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних  
робіт магістрів та заслуговує оцінки «добре». Студент Черній В. А. заслуговує  
присвоєння кваліфікації магістр з комп'ютерної інженерії за заявленою  
спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Керівник

к.т.н., доц. кафедри ІТ



В. Е. Горбачов



## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу другого (магістерського) рівня  
студента Чернія В. А.

на тему: Способи покращення характеристик датчиків магнітного поля для  
їх відповідності вимогам до кінцевих пристроїв мереж інтернету речей

Магістерська робота виконана на 92 сторінках текстової частини та містить три розділи згідно з завданням на магістерську роботу.

У магістерській роботі студента Чернія В. А. розглянуті питання перевірки відповідності параметрів датчиків магнітного поля критеріям використання датчиків в цифрових мережах. Актуальність теми полягає в тому, що в роботі досліджуються способи зменшення споживання енергії кінцевими пристроями Інтернету речей та стабілізації їх параметрів. Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості впровадження подібної методики при побудові та обслуговуванні цифрових мереж на реальних об'єктах.

В роботі Черній В. А. показав достатню теоретичну підготовку та здатність проводити модельні розрахунки.

Пояснювальна записка й графічні матеріали виконані охайно й відповідно до вимог ЄСКД, оформлення демонстраційних слайдів якісне.

Недоліки роботи :

- в Підрозділі 1.2 описано метод економії ресурсів в сенсорних цифрових мережах, але незрозуміло як цей метод стосується до датчика магнітного поля.

Але названі недоліки не знижують цінності виконаної роботи.

Магістерська робота студента Черній В. А. відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних робіт магістрів та заслуговує оцінки «добре». Студент Черній В. А. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з комп'ютерної інженерії за заявленою спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Рецензент

к.т.н., доц. каф. КН



О. П. Русу

Имя пользователя:  
Анна Серединко

Дата проверки:  
21.12.2023 15:17:40 EET

Дата отчета:  
28.12.2023 10:21:41 EET

ID проверки:  
1016028786

Тип проверки:  
Doc vs Internet + Library

ID пользователя:  
100001433

Название файла: Черній

Количество страниц: 95 Количество слов: 17417 Количество символов: 137732 Размер файла: 2.96 MB ID файла: 1015718051

## 18.1% Совпадения

Наибольшее совпадение: 7.52% с Интернет-источником ([https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/58238/1/Omeliashko\\_b..](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/58238/1/Omeliashko_b..))

17.7% Источники из Интернета 770

Страница 97

1.5% Источники из Библиотеки 37

Страница 101

## 0% Цитат

Исключение цитат выключено

Исключение списка библиографических ссылок выключено

## 0% Исключений

Нет исключенных источников

## Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 57



## РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 81 сторінка, 11 рисунків, 2 таблиці, 16 джерел.

ДАТЧИК МАГНІТНОГО ПОЛЯ, ДАТЧИК ХОЛЛА, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, МЕТАМАТЕРІАЛИ, НАНОДІЛЕКТРИКИ.

Об'єкт дослідження – є Інтернет речей (IoT) як глобальна інфраструктура для інформаційного суспільства, що забезпечує передачу даних та взаємодію між фізичними та віртуальними об'єктами з використанням сучасних інформаційних технологій.

Мета роботи – провести дослідження методів забезпечення високої точності вимірювань при мінімальному споживанні енергії, щоб забезпечити ефективне функціонування в умовах IoT.

Метод дослідження – аналітичний з використанням комп'ютерних технологій.

У магістерській роботі проведено аналіз способів покращення характеристик датчиків магнітного поля для їх відповідності вимогам до кінцевих пристроїв мереж Інтернету речей. Робота успішно досягає поставлених цілей і завдань, демонструючи досягнення в технології датчиків магнітного поля та їх інтеграції в мережі IoT, тим самим вносячи значний внесок у розвиток більш ефективних і точних систем IoT.



## ABSTRACT

The text part of the master's thesis: 81 pages, 11 figures, 2 tables, 16 sources

MAGNETIC FIELD SENSOR, HALL SENSOR, INTERNET OF THINGS,  
METAMATERIALS, NANODIELECTRICS

The object of research is the Internet of Things (IoT) as a global infrastructure for the information society, which provides data transfer and interaction between physical and virtual objects using modern information technologies.

The purpose of the work is to conduct a study of methods for ensuring high accuracy of measurements with minimal energy consumption to ensure effective functioning in IoT conditions.

The research method is analytical with the use of computer technologies.

In the master's thesis, an analysis of ways to improve the characteristics of magnetic field sensors for their compliance with the requirements for end devices of Internet of Things networks was carried out. The work successfully achieves its goals and objectives, demonstrating advances in the technology of magnetic field sensors and their integration into IoT networks, thereby making a significant contribution to the development of more efficient and accurate IoT systems.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРИРОДУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА РОБОТУ ДАТЧИКІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	14
1.1. Сутність та поведінка магнітного поля.....	14
1.2. Джерела магнітного поля.....	18
1.3. Магнітний диполь.....	20
1.4. Огляд датчиків магнітного поля.....	21
1.5. Огляд існуючих датчиків магнітного поля в Інтернеті речей.....	24
1.6. Ефект Холла.....	26
1.6.1. Параметри та характеристики датчиків Холла.....	29
1.6.2. Виготовлення та застосування датчиків Холла.....	33
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.....	39
2.1. Аналіз технологій, які використовуються в IoT.....	40
2.1.1. Типи мереж IoT.....	40
2.1.2. Аналіз протоколів мережі IoT.....	42
2.2. Аналіз пристроїв мережі IoT.....	45
2.3. Аналіз архітектури IoT.....	46
2.3.1. Основні складові архітектури IoT.....	47
2.3.2. Сенсори та контролери.....	47
2.3.3. Шлюзи та збір даних.....	49
2.3.4. Центр обробки даних.....	50
2.4. Використання IoT у промисловості на прикладі розумних фабрик.....	51
2.4.1. Підключення та оптимізація розумної фабрики.....	51



2.4.2. Функції самообслуговування на вимогу розумної фабрики .....	53
2.4.3. Виклики в обробній промисловості.....	54
РОЗДІЛ 3 МЕТОДОЛОГІЯ ПОКРАЩЕННЯ ДАТЧИКІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У СИСТЕМІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.....	58
3.1. Сенсорні загрози для ІОТ-пристроїв з датчиками магнітного поля .....	58
3.1.1. Загроза “Висновок за натисканням клавіш” .....	58
3.1.2. Загроза “Виведення завдань” .....	59
3.1.3. Загроза “Передача шкідливих команд датчиків” .....	61
3.2. Існуючі механізми безпеки для запобігання сенсорним загрозам .....	61
3.3. Покращення роботи датчиків магнітного поля за допомогою нанодіелектриків.....	67
3.3.1. Характеристики магніточутливих наноматеріалів.....	68
3.3.2. Методи вимірювання магнітного поля на основі нанодіелектриків .....	73
3.3.3. Реалізація покращення різних вимірювань магнітного поля.....	76
3.3.4. Вимірювання біомагнітного поля на основі нанорозмірних SQUID .....	80
3.3.5. Технологія магнітних датчиків в інтелектуальних мережах .....	81
3.3.6 Майбутній розвиток та перспективи в рамках використання нанодіелектриків у датчиках магнітного поля .....	83
3.4. Покращення роботи датчиків магнітного поля за допомогою метаматеріалів .....	83
3.4.1. Загальна стратегія для підвищення чутливості магнітних сенсорів .....	84
3.4.2. Використання метаматеріалів для підвищення концентрації електромагнітних полів.....	85
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	12
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	14

## ВСТУП

У сучасному світі, де технології Інтернету речей (IoT) стрімко входять у повсякденне життя, актуальність та ефективність датчиків магнітного поля набуває особливого значення.

Ці датчики є критичним компонентом у різноманітних застосуваннях, від промислового обладнання до споживчих електронних пристроїв, і відіграють ключову роль у точності, надійності та ефективності багатьох систем Інтернету речей.

Однак, з постійним розвитком та збільшенням вимог до систем IoT, існуючі датчики магнітного поля часто зіштовхуються з викликами, пов'язаними з точністю вимірювань, енергоефективністю, мініатюризацією, та інтеграцією з іншими компонентами систем. Ці виклики ставлять під сумнів можливість їх ефективного використання у майбутніх поколіннях пристроїв IoT.

У цьому контексті, дана магістерська робота спрямована на дослідження та розробку методів покращення характеристик датчиків магнітного поля, щоб вони відповідали зростаючим вимогам сучасних і майбутніх пристроїв Інтернету речей. Основна увага буде приділена підвищенню точності, чутливості, енергоефективності, та зменшенню розмірів датчиків, а також їх адаптації до широкого спектру застосувань у сфері IoT.

Основною метою даного дослідження є розробка та валідація методів покращення характеристик датчиків магнітного поля, з метою їх ефективного застосування у пристроях Інтернету речей. Це включає аналіз сучасних вимог до датчиків магнітного поля, ідентифікацію ключових проблем, які обмежують їх застосування, та розробку інноваційних підходів для підвищення їхньої точності, чутливості, енергоефективності та загальної функціональності.

Для досягнення мети, робота включатиме наступні ключові завдання:

- аналіз існуючого стану датчиків магнітного поля у Інтернеті речей: огляд поточних технологій, визначення їх переваг та недоліків, аналіз областей застосування;



- визначення ключових викликів та обмежень: ідентифікація основних проблем, з якими зіштовхуються датчики магнітного поля в контексті Інтернету речей, включаючи питання точності, надійності, вартості, та енергоспоживання;
- розробка методів покращення характеристик датчиків: вивчення та адаптація нових підходів та технологій, спрямованих на оптимізацію їхніх параметрів, в тому числі через використання ефекту Хола;
- аналіз отриманих результатів: оцінка ефективності розроблених підходів, порівняння з існуючими рішеннями, визначення потенціалу для практичного застосування;
- формулювання рекомендацій для подальшого використання: розробка настанов та рекомендацій щодо імплементації покращених датчиків у різні області Інтернету речей.

Об'єктом дослідження є Інтернет речей (IoT) як глобальна інфраструктура для інформаційного суспільства, що забезпечує передачу даних та взаємодію між фізичними та віртуальними об'єктами з використанням сучасних інформаційних технологій.

Предметом дослідження є датчики магнітного поля у контексті Інтернету речей, зокрема, методи покращення їх технічних характеристик (таких як точність, чутливість, надійність, енергоефективність) для відповідності вимогам кінцевих пристроїв мереж Інтернету речей.

Розробка та впровадження технологій Інтернету речей (IoT) стає неабиякою відповіддю на зростаючий попит на "розумні" та автономні системи в різних галузях, від промисловості до побуту. Датчики магнітного поля, як важливий компонент IoT, грають ключову роль у забезпеченні збору даних та реагування на зміни у навколишньому середовищі.

Однак існуючі датчики магнітного поля не завжди відповідають вимогам сучасних кінцевих пристроїв, що працюють у складних умовах мережі IoT. Однією з ключових проблем є обмежене енергоспоживання, що обумовлене низькими енергетичними резервами батарей та важливістю довгого терміну служби пристроїв. Також, вимоги до точності та стійкості датчиків магнітного поля зростають у зв'язку з розширенням області їхнього використання.

Таким чином, вирішення цих технічних викликів вимагає наукових досліджень та інженерних рішень для вдосконалення характеристик датчиків магнітного поля.

Особлива увага приділяється забезпеченню високої точності вимірювань при мінімальному споживанні енергії, щоб забезпечити ефективне функціонування в умовах IoT.

Актуальність цієї теми підтверджується стрімким розвитком сучасних технологій та постійним розширенням застосувань Інтернету речей у всіх сферах життя.



## РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРИРОДУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА РОБОТУ ДАТЧИКІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

### 1.1. Сутність та поведінка магнітного поля

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:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{A^2}$  або приближене  $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \frac{Гн}{м}$ .

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. Силовими лініями магнітного поля називаються криві, проведені в просторі так, що у кожній точці поля дотична до такої лінії збігається з напрямком вектору в цій точці[1].

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:

$$\text{Тл} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \times \text{м}} \quad (1)$$

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 1.1 наведені одержувані таким чином картини магнітних полів:

- а) поле постійних магнітів;
- б) поле кругового струму;
- в) поле довгої котушки (соленоїда).

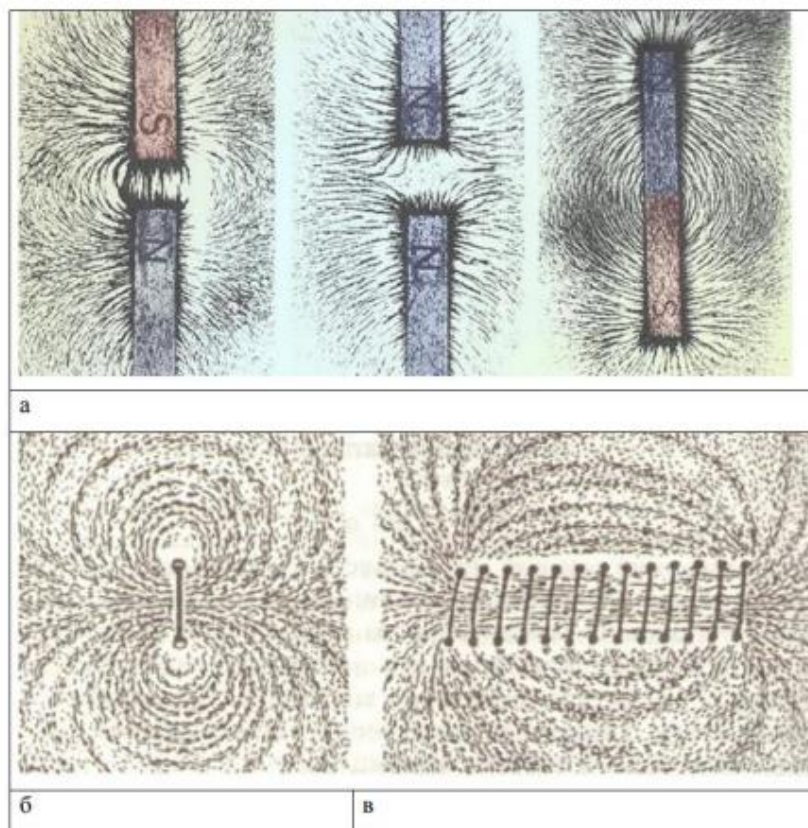


Рисунок 1.1 – Приклади візуалізації магнітних полів

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 струмом  $I$  (рис. 1.2).

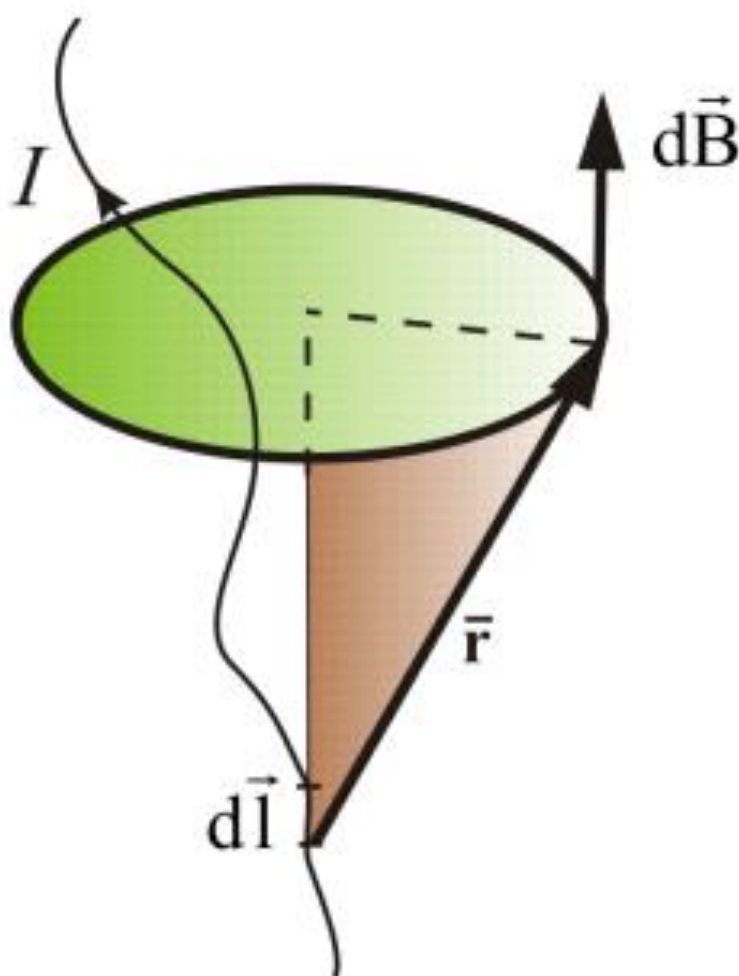


Рисунок 1.2 – Елемент провідника  $d\vec{l}$  зі струмом  $I$  створює в точці, розташованій на відстані  $r$  від провідника, магнітне поле з індукцією  $d\vec{B}$

Для розрахунку магнітної індукції найчастіше застосовують закон Біо-Савара-Лапласа. Закон Біо-Савара-Лапласа: елемент провідника  $dl$  зі струмом  $I$  створює у певній точці магнітне поле з індукцією:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \times \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad (3)$$

де  $\mu_0$  – магнітна постійна,  $r$  - радіус-вектор, проведений з елемента  $d\vec{l}$  провідника дану точку простору.

На досвіді неможливо здійснити окрему ділянку струму, тому 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 індукції магнітного поля, яка є результатом.

Слід зауважити, що розрахунок такої 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 [4].

## 1.2. Джерела магнітного поля

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.

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.



$$B = B_{дж} + B_з \quad (4)$$

Джерела магнітного поля:

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

2. 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.

3. 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.

4. 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.

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

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

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.

Загалом, можна розглянути будь-які джерела магнітного поля, змодельовавши або представивши їх у вигляді магнітного диполя[2].

### 1.3. 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.

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

$$m = B \times S_i$$

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

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.

#### 1.4. Огляд датчиків магнітного поля

Датчики магнітного поля грають важливу роль в Інтернеті речей (IoT) і можуть застосовуватися в різних областях індустрії та побуту. Наприклад:

1. Навігація: датчики магнітного поля можуть використовуватися для навігації в просторі, зокрема в системах внутрішньої навігації (наприклад, в торговельних центрах або аеропортах), де сигнали GPS можуть бути обмежені або відсутні.

2. Моніторинг стану обладнання: у промисловості датчики магнітного поля можуть слугувати для моніторингу та діагностики стану обладнання, сприяючи вчасному виявленню можливих поломок або зносу механізмів.

3. Системи безпеки: датчики магнітного поля можуть бути використані в системах безпеки для виявлення вторгнень або неправильних переміщень об'єктів, наприклад, у сигналізаційних системах або системах відеоспостереження.

4. Системи управління освітленням та температурою: датчики магнітного поля можуть бути використані для оптимізації енергоспоживання в приміщеннях, автоматично регулюючи освітлення та температуру відповідно до змін магнітного поля, які можуть вказувати на присутність або відсутність людей.



5. Системи «розумного дому»: у «розумних домах» датчики магнітного поля можуть бути використані для автоматизації різних функцій, таких як увімкнення електроприладів або визначення положення рухомих об'єктів.

6. Медичні пристрої: датчики магнітного поля можуть застосовуватися в медичних пристроях для вимірювання певних параметрів або моніторингу руху та позиції пацієнтів.

7. Автомобільна промисловість: у сучасних автомобілях датчики магнітного поля можуть використовуватися для систем навігації, виявлення інших транспортних засобів або для покращення систем автопілоту.

Датчики магнітного поля відіграють ключову роль у розширенні функціональності та ефективності різноманітних IoT-рішень, сприяючи створенню більш «розумних» та автоматизованих систем. Розглянемо поняття сенсору, яке є фундаментальним для дослідження Інтернету речей.

Сенсор – такий конструктивно складний пристрій, що слугує для вимірювання фізичних величин, який реагує безпосередньо на сигнал у зоні вимірювання. Завдяки сенсорам можна здійснити велику кількість різноманітних перетворень, зокрема, фізичних величин в електричний сигнал.

Сенсорним пристроєм називається сукупність первинного та вторинного перетворювачів. Первинний перетворювач вмикається першим в коло пристрою, слугує для перетворення вхідного сигналу у вихідний який буде зручнішим для подальшої обробки. Вторинний слугує для обробки інформації з первинного, він подає інформацію в зручному для користувача вигляді. Вихідними сигналами датчиків можуть бути напруга, струм або заряд, які описуються такими характеристиками як амплітуда, частота, фаза або цифровим кодом.

Набір характеристик, що описують сигнал, називається форматом вихідного сигналу. Кожен датчик характеризується набором вхідних параметрів (будь-якої фізичної природи) і набором вихідних параметрів.

Датчик магнітного поля є основним елементом будь-якого магнітометра і призначений для перетворення магнітної індукції  $B$  в електричний сигнал, найчастіше в напругу  $U$ . При створенні датчиків магнітного поля використовуються різні фізичні ефекти, наприклад, Холла, Гаусса та ін.

Залежно від використовуваного ефекту датчики магнітного поля поділяються на типи, що показані на рисунку 1.3.

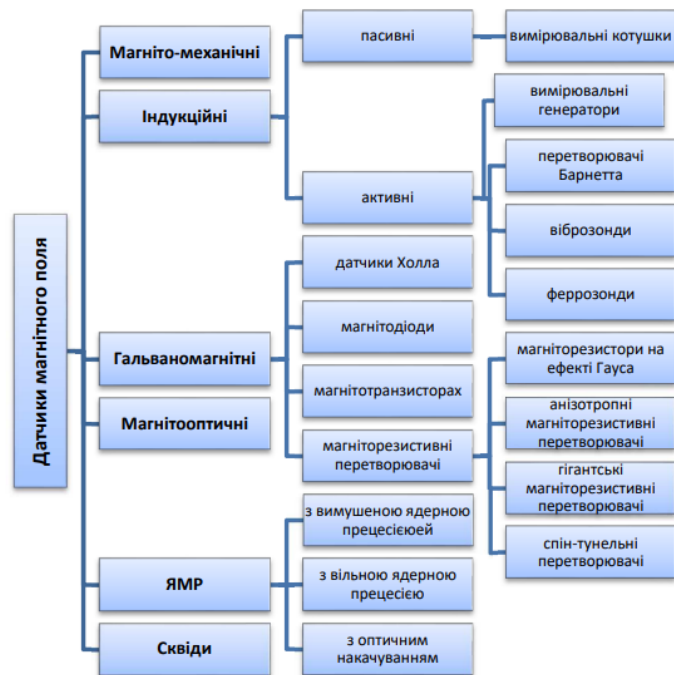


Рисунок 1.3 – Види датчиків магнітного поля

Найпростіший сенсор магнітного поля складається з магніточутливого елемента, який наноситься на підкладку, має виводи для з'єднання з електронною схемою посилення і обробки сигналу (рис. 1.4).

Магніточутливий елемент є частиною виробу, що здійснює функцію сприйняття контрольованих параметрів середовища або об'єкта і перетворює їх значення у власні електричні параметри [3].

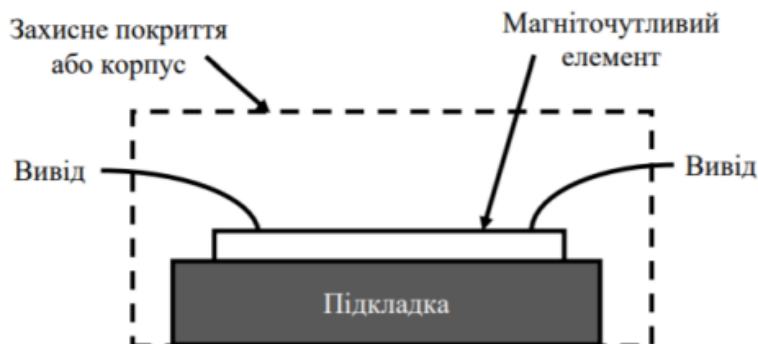


Рисунок 1.4 – Конструкція найпростішого сенсора магнітного поля

Магніточутливі елементи виготовляються з матеріалів, що змінюють свої властивості під впливом зовнішнього магнітного поля. При створенні магніточутливих елементів використовуються різні фізичні явища, що відбуваються в напівпровідниках і металах при взаємодії їх з магнітним полем.

Пристрої котрі працюють за допомогою ефекту Холла основані на так званому гальваноманітному явищу [4]. Гальваноманітними називаються явища фізичного походження котрі виникають під дією електричного струму в матеріалі при проходженні крізь нього магнітного поля. В сучасності найпоширенішими гальваноманітними явищами є ефект Холла та магнітоопору[5].

### 1.5. Огляд існуючих датчиків магнітного поля в Інтернеті речей

Датчики магнітного поля в мережі Інтернету речей (IoT) відіграють ключову роль у зборі інформації про навколишнє середовище, що важливо для функціонування розумних систем та пристроїв. Огляд деяких існуючих типів датчиків магнітного поля в IoT:

1. Холловські датчики. Одні з найпоширеніших у застосуваннях IoT. Вони використовують ефект Холла для вимірювання магнітного поля, генеруючи напругу, яка пропорційна інтенсивності поля. Застосовуються в системах навігації, вимірювальних пристроях та електроніці споживчого призначення.

2. Магніторезистивні датчики. Основані на зміні опору матеріалу під впливом магнітного поля. Знаходять застосування в датчиках позиції, компасах та системах навігації.

3. Флюкс-гейтові датчики. Вимірюють магнітний потік в спеціально створеному феромагнітному матеріалі. Використовуються в вимірюваннях індукції та навігації.

4. Магнітні датчики на основі ЖК-екранів. Використовують зміни в орієнтації рідких кристалів під впливом магнітного поля. Застосовуються в інноваційних технологіях та дисплеях.



5. Магнітоіндуктивні датчики. Вимірюють індукцію магнітного поля в області сенсора. Застосовуються в системах безпеки, автомобільних системах та промислових системах управління.

Ці датчики відзначаються різними характеристиками, такими як чутливість, точність, споживана енергія та здатність адаптуватися до конкретних умов використання. Розвиток цих технологій відкриває нові можливості для створення ефективних та енергоефективних систем IoT.

У таблиці 1.1 наведена порівняльна характеристика сенсорів магнітного поля. Коректна оцінка результатів неможлива через ряд об'єктивних критеріїв. Це пов'язано з високою складністю систем датчиків, різними їх конструкціями, різною геометрією та розмірами чутливих елементів, різними системами обробки отриманих сигналів[6].

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик сенсорів магнітного поля

Тип датчика	Розмір активної частини, мм <sup>2</sup>	Магнітна чутливість, В/Тл	Діапазон вимірювальної індукції, мТл	Діапазон робочих частот, Гц	Динамічний діапазон, мТл	Споживана потужність, мВт
Холловські	0.02-50	0.02-5	$10^{-4}$ - $10^3$	0- $10^7$	1000	10-50
Магніторезистивні	0.3-100	1-60	$10^{-4}$ - $10^2$	0- $10^9$	300-1000	30-90
Флюкс-гейтові	1-100	10	$10^{-7}$ -10	0- $10^4$	0.1-1	5-50
Магнітні	25-50	25	-	0- $10^9$	1000-2000	1-5
Магнітоіндуктивні	10x8x4	1-10	$10^{-3}$ - $10^3$	0- $10^6$	1-200	-

### 1.6. Ефект Холла

В основі датчиків електрорушійної сили (ЕРС) Холла лежить явище викривлення шляху носіїв заряду напівпровідниках, що у магнітному полі. Це явище вперше було відкрито американським фізиком Едвіном Холлом у 1876 році. Розглянемо прямокутну пластину напівпровідника з електропровідністю n-типу, розташовану, як показано на рисунку 1.5.

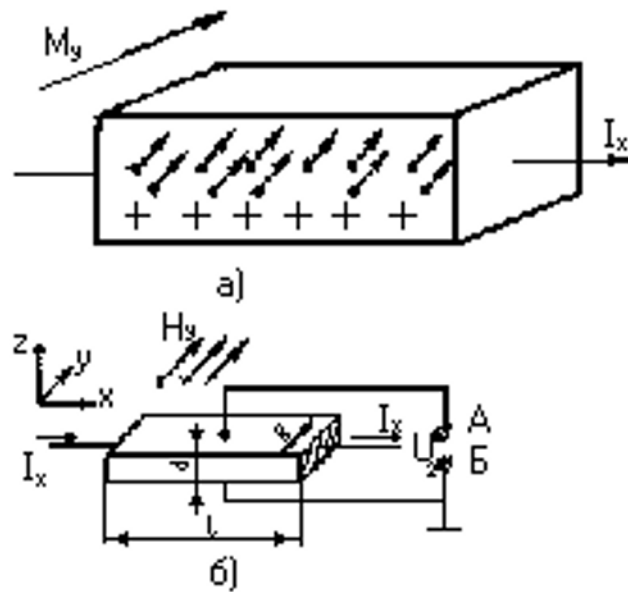


Рисунок 1.5 – Схема виникнення ЕРЛ Холла

У напрямку осі  $x$  протікає струм  $I_x$  від зовнішнього джерела. Пластина поміщена в магнітне поле  $H_y$ , перпендикулярне до напрямку струму.

За відсутності магнітного поля електрони рухаються у пластині у бік електричного поля  $E_x$ . У магнітному полі електрони відхиляються під дією сили Лоренца:

$$F = -e(v_x B_y) \quad (6)$$

де  $e$  – заряд електрона;  $B_y$  – індукція магнітного поля, спрямованого вздовж осі  $y$ ;  $v_x = -\mu_n E_x$  – швидкість електрона у напрямі струму;  $\mu_n$  – рухливість електронів.

Ця сила спрямована перпендикулярно як напрямку магнітного поля, так і напрямку струму (вздовж осі  $Z$ , рис. 1.5). Тому електрони зміщуються перпендикулярно до напрямку їхнього початкового руху.

За умов, показаних на рисунку 5, на затиску А повинен бути негативний потенціал щодо затиску Б, так як верхня поверхня напівпровідника, до якої відхиляються електрони, буде заряджатися негативно, а протилежна поверхня – позитивно.

Заряди створюють у пластині поперечне електричне поле, назване на ім'я вченого полем Холла. Процес утворення об'ємних зарядів біля поверхонь припиниться лише тоді, коли напруженість поля Холла повністю компенсуватиме дію на електрони сили Лоренца.

Умова рівності сил, що діють на електрон з боку електричних та магнітних полів, може бути записана у вигляді:

$$-e(v_x B_y) = eE_z \quad (7)$$

звідки може бути визначено поле Холла:

$$E_z = -(v_x B_y) = -\mu_n B_y E_x \quad (8)$$

чи ЕРЛ Холла:

$$U_z = -\frac{\mu_n B_y}{d} E_x \quad (9)$$

де  $d$  - товщина пластини (рис. 1.1, б). Виникнення ЕРС Холла називається ефектом Холла.

Протікає через зразок із шириною  $b$  і перерізом  $S$  струм щільністю  $j_x$ , обумовлений дією електричного поля, пов'язаний з концентрацією та швидкістю електронів співвідношенням:

$$I_x = j_x S = en v_x S = en v_x b d \quad (10)$$

Вирішуючи спільно рівняння (9) і (10), отримаємо:

$$U_z = -\frac{1}{en} \times \frac{B_y I_x}{d} = R_x \frac{B_y I_x}{d} \quad (11)$$



де  $R_x = -1/ep$  - коефіцієнт Холла, що зв'язує поперечну різницю потенціалів з індукцією магнітного поля. Величина його залежить від матеріалу пластини, вмісту домішок та температури.

З виразу (11) випливає, що величина ЕРС Холла залежить від фізичних властивостей матеріалу пластини, від її розмірів, а також, від величини струму, що протікає через неї, і від магнітного поля, що впливає на цей струм.

Якщо пластинка має електропровідність р-типу, то основна частина струму створюється дірками, що рухаються ліворуч, тоді в лівій частині рівняння (7) слід поставити знак плюс. Траєкторії дірок у цьому випадку зміщуватимуться вгору, верхня поверхня накопичуватиме позитивний заряд і ЕРС Холла буде позитивною.

Висновок висловлювання для ЕРС. Холла зроблено без урахування хаотичного теплового руху електронів та їхнього розподілу за швидкостями. Суворіший розрахунок дає формулу для коефіцієнта Холла в напівпровіднику з електропровідністю n-типу:

$$R_x = -\frac{3\pi}{8ne} \quad (12)$$

та у напівпровіднику з електропровідністю р-типу:

$$R_x = \frac{3\pi}{8pe} \quad (13)$$

Для напівпровідників, які мають власну електропровідність або містять носії заряду обох типів у порівнянних концентраціях, коефіцієнт Холла описується виразом:

$$R_x = \pm \frac{3\pi}{8e} \times \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2} \quad (14)$$

Якщо концентрації електронів і дірок у зразку рівні та рівні їх рухливості, то ЕРС Холла дорівнюватиме нулю, так як напрямок руху дірок протилежно

напрямку руху електронів і електрони і дірки зміщуватимуться магнітним полем в ту саму сторону.

Насправді, в напівпровідниках рухливість електронів більша за рухливість дірок, тому у власному напівпровіднику е.д. с. Холла відповідає за знаком електронного зразка. При переході від власної електропровідності до діркової ЕРЛ Холла проходить через нуль і змінює знак[7].

### 1.6.1. Параметри та характеристики датчиків Холла

Датчик Холла є магнітоелектричний напівпровідниковий прилад, заснований на використанні ефекту Холла. На рисунку 1.6 показано схеми ввімкнення датчика Холла.

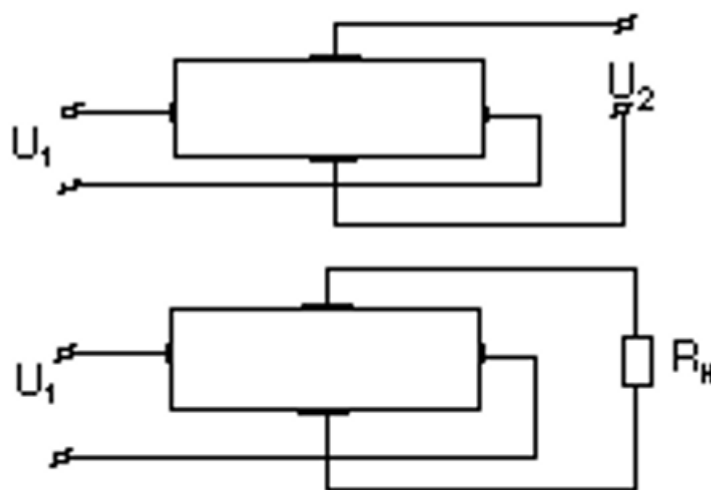


Рисунок 1.6 – Схеми ввімкнення датчика Холла

Напруга, що подається на керуючі електроди  $U_1$ , називається вхідною напругою датчика Холла, а опір  $R_1$  між цими електродами називається вхідним опором.

Величина цього опору за відсутності магнітного поля визначається за формулою:

$$R_1 = \frac{pl}{bd} \quad (15)$$

де  $p$  - питомий опір напівпровідника. При зростанні напруженості магнітного поля вхідний опір збільшується.

Напруга між двома іншими (холлівськими) контактами називається вихідним та позначається  $U_2$  (рис. 1.2). Опір між холлівськими контактами називається вихідним і позначається  $R_2$ . Розмір його за відсутності магнітного поля визначається виразом:

$$R_2 = \frac{pl}{la} \quad (16)$$

Тут не враховано нерівномірність розподілу струму перерізу датчика. Вихідний опір, як і вхідний, зі збільшенням магнітного поля зростає.

На рисунку 1.7 наведено сімейство вольт-амперних характеристик датчика для того самого значення вхідного струму і для кількох значень індукції магнітного поля. Зі зростанням поля крутість зростає внаслідок того, що зростає внутрішній опір датчика  $R_2$ .

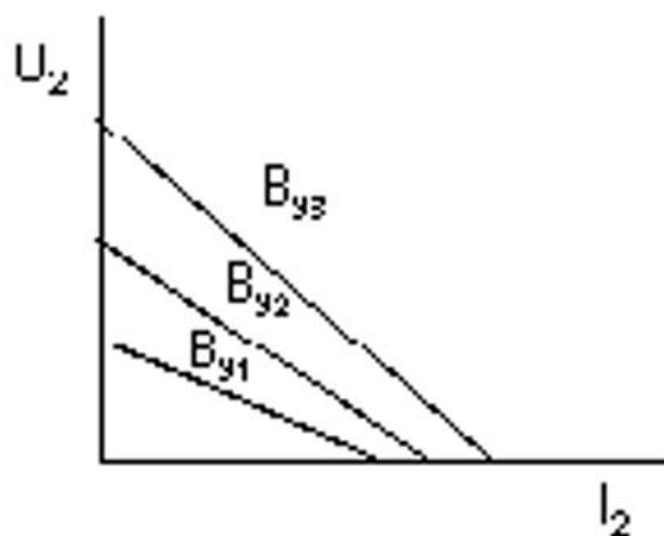


Рисунок 1.7 – Сімейство вольт-амперних характеристик датчика Холла



Однією з важливих характеристик датчика, що дозволяє оцінити його ефективність, є коефіцієнт передачі  $K$ . Він визначається як відношення вихідної напруги до вхідного при заданому значенні магнітного поля, що управляє:

$$K = \frac{U_2}{U_1} \quad (17)$$

Враховуючи вирази (11), (13) і те, що  $I_1 = U_1/R_1$ , можна знайти коефіцієнт передачі:

$$K = \frac{R_x B d}{p l} \quad (18)$$

Коефіцієнт передачі із збільшенням індукції магнітного поля зростає. Зазвичай датчик ЕРС Холла працює на зовнішнє навантаження. Схема включення показано на рисунку 1.6 (нижній малюнок). Потужність, що підводиться до датчика від зовнішнього джерела струму, дорівнює:

$$P_1 = \frac{I_1^2 p b}{l d} \quad (19)$$

Струм, що протікає у вихідний ланцюга датчика Холла:

$$I = \frac{U_2}{R_2 + R_n} \quad (20)$$

де  $R_n$  - опір навантаження. Потужність, що віддається у навантаження:

$$P_n = I_2^2 R_n = \frac{U_2^2 R_n}{(R_2 + R_n)^2} \quad (21)$$

При узгодженні вихідного опору та навантаження досягається максимальна потужність, що віддається у навантаження  $P_H$ :

$$P_H = \frac{U_2^2}{4R_2} = \frac{U_2^2 l d}{4p b} \quad (22)$$

Враховуючи (11), отримаємо:

$$P_H = \frac{R_x^2 I_1^2 B^2 l}{4pbd} \quad (23)$$

Максимальна потужність, що віддається, обмежується гранично допустимою потужністю розсіювання на датчику. Коефіцієнт корисної дії датчика Холла визначається як відношення потужності, що віддається в навантаження до потужності на його вході:

$$\eta = \frac{P_n}{P_1} \quad (24)$$

При узгодженому навантаженні, враховуючи (17) та (21), коефіцієнт корисної дії датчика Холла зазвичай не перевищує 20%. Розмір його залежить від вхідного струму:

$$\eta = \left(\frac{R_x B l}{2pl}\right)^2 \quad (25)$$

Для збільшення ЕРС Холла та вихідний потужності необхідно збільшувати вхідну потужність.

Важливою характеристикою датчика Холла є чутливість  $\gamma$ . Визначається вона як ЕРС, що виникає на холівських контактах при одиничному керуючому струмі та одиничному значенні магнітної індукції:

$$\gamma = \frac{U_2}{BI_1} = \frac{R_x}{d} \quad (26)$$

Вираз (11) з урахуванням (23) набуде вигляду:

$$U_2 = \gamma BI_1 \quad (27)$$

Важливим параметром датчика Холла є відношення, що характеризує ЕРС Холла, що припадає на одиницю магнітної індукції[8]. Цей параметр називається магнітною чутливістю:

$$\gamma = \frac{U_2}{B} = \frac{R_x R I_1}{d} \quad (28)$$

### 1.6.2. Виготовлення та застосування датчиків Холла

Для виготовлення датчиків Холла необхідно досягати наступних основних показників:

- високого значення  $R_x$ , коли необхідно одержати високе значення ЕРС Холла в режимі холостого ходу;
- високої провідності при заданому значенні коефіцієнта Холла, коли датчик працює на зовнішнє навантаження, що споживає струм, частина ЕРС Холла падає на внутрішньому опорі датчика між електродами Холла, що зумовлює шкідливі втрати;
- низького температурного коефіцієнта, коефіцієнта Холла та провідності.

Матеріал, з якого виготовляють датчик Холла, повинен мати максимальну рухливість зарядних носіїв з мінімальними температурними залежностями рухливості і концентрацій носіїв заряду.

З формули (11) видно, що з отримання найбільшого значення ЕРС Холла необхідно вибрати матеріал із невеликою електропровідністю.

Для цього ланцюга використовують плівки селеніду та телуриду ртуті, антимоніду індію та тверді розчини цих сполук. Вони мають високу рухливість носіїв заряду навіть у тонких монокристалічних плівках.

Тонкоплівкові датчики, отримані методом випаровування з цих матеріалів, мають слабку залежність коефіцієнта Холла і опору від температури і від напруженості магнітного поля, що визначило їх широке застосування, незважаючи на порівняно низьку ЕРС Холла.

Для виготовлення датчиків Холла застосовують також монокристалічний германій та кремній, леговані миш'яком, фосфором та сурмою. Датчики, виготовлені з цих матеріалів, мають високий коефіцієнт Холла та низький температурний коефіцієнт (особливо кремнієві). Максимальна величина ЕРС Холла сягає 1В.

Застосовується для виготовлення датчиків Холла антимонід індію, арсенід індію, а також сплав антимоніду індію та ангімоніду галію. Датчики, виготовлені з цих матеріалів, мають сильну залежність опору та коефіцієнта Холла від температури та магнітного поля. Це обмежує їхнє застосування.

З формули (6) видно, що ЕРС Холла буде тим вищим, чим тонший зразок напівпровідника. Тому датчики ЕРС Холла виготовляють у вигляді пластин або тонких плівок, тим більше, що з їх допомогою проводиться вимірювання магнітних полів у малих зазорах.

Для отримання високого коефіцієнта передачі геометричні розміри необхідно вибирати у співвідношенні  $l/b = 2 \div 3$ .

Напівпровідниковий злиток розрізається на пластини, які за допомогою шліфування доводяться до необхідної товщини. Далі пластини розрізають на прямокутники потрібних розмірів, які постачають чотирма омічними контактами. Два з них призначені для підведення датчика напруги від зовнішнього джерела.

Вони виконуються по всій ширині пластини, щоб отримати рівномірний розподіл вхідного струму перерізу пластини на всій її довжині. Два інших електроди призначені для реєстрації ЕРС Холлі.

Ці контакти повинні бути розташовані строго в одному перерізі, інакше між ними виникатиме різниця потенціалів і за відсутності магнітного поля за рахунок протікання струму.

Зважаючи на те, що вихідний струм дуже малий, іноді вихідні електроди виконують точковими. З телуриду та селеніду ртуті датчики Холла можуть бути виготовлені також пресування порошоків при температурі близько 500 К.

Плівкові датчики виготовляють за допомогою нанесення тонких плівок на підкладку методом вакуумного випаровування вихідного матеріалу.



Матеріалом підкладки можуть бути слюда, кераміка або інші ізоляційні матеріали. Матеріал підкладки повинен забезпечити хорошу адгезію матеріалу, що напилюється, і мати з ним близький температурний коефіцієнт лінійного розширення.

Контакти плівкових датчиків наносять випаровуванням у вакуумі. Для стабілізації параметрів готову плівку протягом кількох годин піддають термостарінню при температурі  $100^{\circ}\text{C}$ . Плівкові датчики тонші за пластинкові. Їхня товщина визначається в основному підкладкою. Перевагою їх є високий опір, що зручно за узгодженням з навантаженням.

Набули розвитку два нові прогресивні методи виготовлення датчиків Холла. Це метод дифузії, домішки і метод епітаксійного вирощування. Обидва ці методи широко застосовують при виготовленні діодів та транзисторів.

За допомогою дифузії домішки на матеріалі р-типу утворюється р-п-перехід. На дифузійному n-шарі розміщуються електроди, а р-п-перехід служить ізолюючим шаром (рис. 1.8).

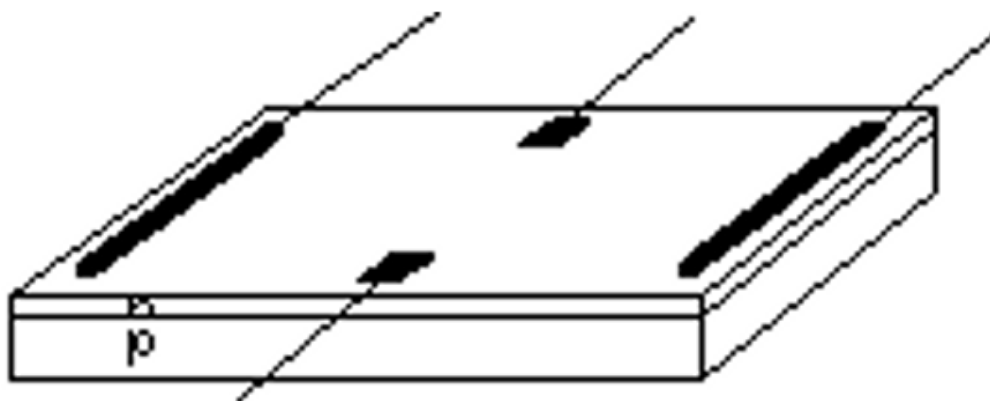


Рисунок 1.8 – Дифузійний датчик Холла

При епітаксійному вирощуванні підкладкою може бути монокристалічна пластина того ж матеріалу, так і ізоляційні матеріали.

Датчики Холла, отримані цими методами, мають переваги монокристалічних датчиків (високий коефіцієнт Холла та хорошу стабільність)

та переваги плівкових (високу чутливість). Товщина робочого шару у них не більше ніж у плівкових.

Для захисту від механічних та кліматичних впливів виготовлений датчик покривають синтетичною смолою та приклеюють до ізоляційної підкладки або поміщають у бронзовий корпус. Останній сприяє відведенню від датчика тепла.

На рисунку 1.9 наведено кілька конструктивних виконань датчика Холла:

а) датчик, що випускається без корпусу і підлягає заливанню компаунд після установки в повітряний зазор магнітопроводу;

б) датчик, укладений в феритову оболонку з симетричною магнітною системою;

в) датчик з оболонкою з епоксидної смоли.

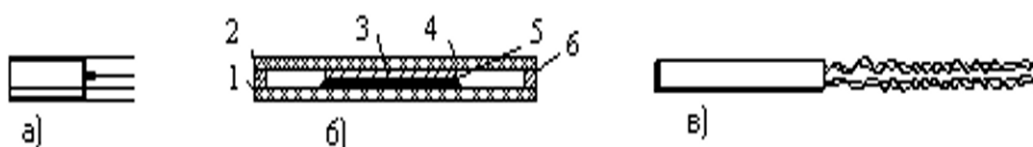


Рисунок 1.9 – Конструктивні виконання датчиків Холла

Феритова основа 1 і кришка 4 мають однакові розміри. Напівпровідникова пластина 6 наклеєна прямо на феритову основу. Феритовий стрижень 3 концентрує магнітний потік на поверхню датчика.

Стінки 5 і 2 виконані з немагнітного матеріалу та забезпечують необхідний зазор між феритовим стрижнем і напівпровідниковою пластиною (зазвичай 2-3 мкм).

На основі ефекту Холла можна створити ряд пристроїв і приладів, які мають цінні і навіть унікальні властивості і займають важливе місце у вимірювальній техніці, автоматиці, радіотехніці, тощо.

Бо ЕРС Холла пропорційна струму  $I$  та індукції магнітного поля, то при постійній величині струму величина ЕРС буде пропорційна лише індукції магнітного поля.

Це дозволяє використовувати датчики Холла для вимірювання індукції магнітних полів. Однією з приладів, у яких використовується ця властивість, є магнітометр, який вимірює як малі, і великі поля ( $10 — 10^6$  А/м).

Крім того, датчики ЕРС Холла застосовують для вимірювання струмів та потужностей. Якщо підтримувати постійну напруженість магнітного поля, то ЕРС Холла буде змінюватися пропорційно до величини струму, що протікає через датчик.

Якщо датчик Холла помістити в магнітне поле, пропорційне струму, що протікає через навантаження, і на вхід його подати напругу, пропорційне напрузі на навантаженні, то ЕРС Холла буде пропорційна потужності, що виділяється у навантаженні. Датчики Холла можуть застосовуватись для вимірювання сили, тисків, кутів, переміщень та інших неелектричних величин.

Якщо, наприклад, датчик Холла переміщати в неоднорідному магнітному полі, підтримуючи постійним вхідний струм, то ЕРС Холла буде змінюватися пропорційно напруженості магнітного поля, а отже, і місцезнаходження датчика.

У напівпровідниковому виробництві ефект Холла використовується для вимірювання рухливості та концентрації носіїв напівпровідникового матеріалу. Для цього на спеціальному підготовленому зразку вимірюють ЕРС Холла і за його величиною судять про рухливість та концентрацію носіїв заряду матеріалу, що використовується для виготовлення напівпровідникових приладів[9].

## РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Інтернет Речей (IoT) представляє собою інноваційну ідею, де Інтернет перетворюється з мережі, що з'єднує комп'ютери та людей, у мережу, яка об'єднує різні (розумні) предмети.

Завдяки постійному прогресу в технологіях, Інтернет Речей відкриває двері для нових інновацій, розширюючись у велику обчислювальну мережу, де все буде підключено через Інтернет.

IoT неперервно розвивається, набуває популярності у наукових дослідженнях. Звичний Інтернет перетворюється на більш інтегровану й модернізовану форму.

Кількість пристроїв, які використовують Інтернет, зростає, і їхнє з'єднання через проводові або бездротові мережі забезпечує доступ до обширної інформації.

Розвиток IoT підсилює взаємодії між розумними машинами та передовими технологіями. Проте, технології, що лежать в основі Інтернету Речей, не є абсолютно новими.

Розвиток Інтернету речей (IoT) прискорюється завдяки все більшій кількості пристроїв з електронними компонентами, програмним забезпеченням і можливістю комунікації, таких як смартфони, камери на нафтових бурових установках, або оптичні датчики на металургійних заводах. Ці пристрої збирають та передають дані, і передбачається, що незабаром вони стануть універсальними на виробничих підприємствах.

Значення IoT зростає через збільшення кількості пристроїв, які можуть обмінюватися даними без участі людини, що застосовується як у побуті, так і у промисловості. Під впливом сучасних інформаційних технологій змінюються управлінські процеси, стаючи більш автоматизованими та прозорими. Україна була першопрохідцем у питанні автоматизації управлінських рішень ще в 80-х роках минулого століття, коли вченим В.М. Глушковим була запропонована програма “Загальнодержавна автоматизована система”, або ЗДАС.



В країні прийняті закони, що впливають на використання та розвиток IoT. Обираючи тему IoT, враховується швидкий розвиток технологій, що дозволяють підприємствам переходити від ручної праці до автоматизованої, а в побуті з'являються пристрої, що полегшують життя.

IoT забезпечує нові можливості для бізнесу, пропонуючи конкурентні переваги. За прогнозами, до 2020 року ринок IoT досягне \$7,1 трлн, що свідчить про величезний потенціал цієї галузі. IoT вважається третьою хвилею інформаційної революції, за якою, ймовірно, слідує розвиток штучного інтелекту[10].

## 2.1. Аналіз технологій, які використовуються в IoT

У Інтернеті речей 'речами' переважно є глибоко інтегровані пристрої, які вирізняються обмеженою пропускною спроможністю, регулярним збором даних і невеликим обсягом оброблюваних даних.

Ці пристрої обмінюються даними між собою та передають інформацію через інтерфейси. Деякі вбудовані пристрої IoT, такі як відеокамери високої чіткості, VoIP відеотелефони та інші подібні, потребують ширококутового стрімінгу для своєї роботи. Проте більшість інших продуктів потребують передачі пакетів даних лише зрідка.

### 2.1.1. Типи мереж IoT

Для глибшого розуміння мережевих структур в контексті IoT, важливо ознайомитись з різними типами мереж, які використовуються. Серед них є мережі, що відрізняються низьким енергоспоживанням та обмеженим радіусом робочих можливостей.

Такі мережі ідеально підходять для застосування в домашніх умовах, офісах та інших малих просторах, вимагаючи мінімального акумуляторного живлення або навіть функціонуючи без акумуляторів.

Ці мережі мають ефективну економічність у використанні. До найбільш вживаних належать:

- Bluetooth – забезпечує швидку передачу даних і голосу, здатний передавати сигнали на відстань до 10 метрів;
- Wi-Fi/802.11 – це рентабельний варіант для домашніх і офісних умов, хоча має обмеження у вигляді вузького діапазону покриття та високого споживання енергії;
- Z-Wave – це спеціалізована мережа для підключення домашніх пристроїв, що використовує енергоефективні радіохвилі для передачі даних і забезпечує інтеграцію домашніх автоматизованих систем на рівні додатків;
- Zigbee – цей варіант вибирають для домашніх автоматизаційних систем та медичних пристроїв, ідеально підходить для особистих мереж з малими, енергоефективними пристроями, обмеженою пропускну здатністю та використанням у замкнутому радіусі.

Технології низького енергоспоживання для широкого охоплення (LPWAN) відіграють ключову роль у світі Інтернету речей. Ці мережі забезпечують зв'язок на значні відстані (до 500 метрів) і характеризуються ефективним енергоспоживанням, що робить їх ідеальними для багатьох IoT пристроїв. Яскравим прикладом є LoRaWAN, мережі з великим охопленням, які забезпечують безпечний двосторонній зв'язок між батарейними пристроями. Нижче представлено деякі з найбільш вживаних стандартів:

- 4G LTE для Інтернету речей – ці мережі пропонують високу пропускну спроможність і мінімальну затримку, що робить їх ідеальними для сценаріїв IoT, де потрібні миттєві оновлення і передача даних в реальному часі;
- 5G IoT – сучасні 5G IoT мережі ще на стадії розробки. Очікується, що в майбутньому вони значно прискорять інновації в IoT, забезпечуючи високу швидкість передачі даних і підключення великої кількості пристроїв;
- Cat-0 – економічно ефективні LTE-мережі, які формують основу для Cat-M технології, призначеної для заміни мереж 2G;

- Cat-1 – цей мобільний стандарт IoT призначений для заміни мереж 3G. Cat-1 мережі легко налаштовуються і є відмінним вибором для додатків, що потребують голосового зв'язку або веб-інтерфейсу;
- LTE Cat-M1 – ці мережі є повністю сумісними з LTE і дозволяють оптимізувати вартість і потужність LTE мікросхем другого покоління, розроблених спеціально для IoT додатків;
- підключення з вузьким діапазоном частот – ця технологія базується на частині стандарту LTE, призначена для покриття усередині будівель, забезпечує низькі операційні витрати та довготривалу роботу на батареї;
- NB-IoT/Cat-M2 – ці системи використовують модуляцію з розширеним спектром та послідовний перебіг (DSSS) для прямої передачі даних на сервер, що виключає потребу в шлюзі. Встановлення мереж NB-IoT має вищу вартість, але знижені експлуатаційні витрати завдяки відсутності шлюзів;
- Sigfox – цей провідний міжнародний оператор мереж Інтернету речей пропонує бездротові мережі для з'єднання пристроїв з низьким рівнем споживання енергії, які постійно генерують дані.

### 2.1.2. Аналіз протоколів мережі IoT

Обговоримо протоколи, які застосовуються в інфраструктурі Інтернету речей. Девайси в цій мережі взаємодіють, обмінюючись інформацією через спеціалізовані протоколи.

Протокол IP задає правила для передачі даних в мережі Інтернет, гарантуючи, що дані, відправлені з одного пристрою або датчика, будуть коректно зчитані та інтерпретовані іншим пристроєм. Важливо вибрати відповідний протокол залежно від контексту й типу пристрою в мережі Інтернету речей, оскільки існує різноманіття таких девайсів.

Вибір конкретного протоколу Інтернету речей залежить від рівня системної архітектури, де повинна відбуватися передача даних. Модель OSI визначає різні рівні, на яких відбувається обмін даними.

Кожен протокол в архітектурі Інтернету речей сприяє взаємодії між різними компонентами: пристроями, шлюзами, центрами обробки даних або хмарними ресурсами, а також координує обмін інформацією між цими елементами:

- протокол управління чергою Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) діє як інтерфейс для взаємодії між програмним забезпеченням середнього рівня, що здійснює обмін повідомленнями. Ця технологія забезпечує сумісність різних систем та програм, сприяючи формуванню уніфікованої системи обміну повідомленнями на промисловому рівні;

- протокол Constrained Application Protocol (CoAP) є мережевим протоколом, який спрощує передачу даних для обмежено потужних пристроїв. Цей протокол спрямований на забезпечення ефективного обміну даними між комп'ютерами. Окрім цього, CoAP використовується для передачі документів через UDP-протокол;

- протокол DDS (Data Distribution Service) є гнучким та високоспеціалізованим комунікаційним стандартом, призначеним для вирішення різноманітних завдань - починаючи від управління невеликими пристроями та закінчуючи інтеграцією у складних високопродуктивних мережевих системах. DDS оптимізує процес впровадження, підсилює надійність систем та знижує їхню складність;

- протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) розроблений для ефективної передачі даних у системах з обмеженими ресурсами. Цей протокол є особливо корисним для з'єднань з низькою швидкістю передачі даних і віддаленими місцями розташування. MQTT працює за принципом підписки на теми, що робить його ідеальним рішенням для пристроїв з обмеженими ресурсами, наприклад, тих, що працюють від батарей;

- TCP, ключовий протокол у більшості випадків з'єднання з Інтернетом, гарантує передачу даних між різними точками мережі. Цей протокол розділяє великі блоки інформації на менші сегменти. У разі необхідності, ці сегменти можуть бути повторно відправлені та переорганізовані для забезпечення надійності;

- UDP, протокол, який використовується для комунікації між процесами в мережі, базується на IP протоколі. Він покращує швидкість передачі даних у порівнянні з TCP, роблячи його ідеальним для застосунків, які потребують надійної передачі даних без затримок чи втрат;

- 6LoWPAN – це адаптована версія IPv6 зі зниженою потужністю, яка зменшує час передачі даних;

- IPv6 – це найсвіжіше оновлення протоколу IP, яке займається маршрутизацією інтернет-трафіку та ідентифікацією пристроїв у мережі. На канальному рівні передача даних здійснюється в рамках системної архітектури, де також відбувається виявлення та коригування помилок, виявлених на фізичному рівні;

- IEEE 802.15.4 – це стандарт для мобільних пристроїв, призначений для бездротового з'єднання з низьким споживанням енергії. Цей стандарт використовується разом із Zigbee, 6LoWPAN та іншими стандартами для створення бездротових мереж;

- LPWAN – Тип мережі, який забезпечує комунікацію на відстані до 500 метрів. LoRaWAN є одним із прикладів LPWAN, оптимізованих для економії енергії.

Рівень додатків забезпечує інтерфейс для обміну даними між кінцевим користувачем та пристроєм. У фундаменті технологічної взаємодії закладається створення каналу зв'язку на фізичному рівні, що дозволяє під'єднувати пристрої в обраному оточенні:

- Bluetooth Low Energy (BLE) відрізняється зниженим споживанням енергії та вартістю, при цьому зберігаючи той самий радіус дії, що й традиційний Bluetooth. Особливість BLE полягає у безпосередній підтримці мобільними ОС, що сприяє його популяризації у сегменті споживчої електроніки через енергоефективність та довготривалу роботу на батареї;

- Ethernet представляє собою бюджетне дротове з'єднання, яке забезпечує швидкісний доступ до даних та меншу затримку порівняно з бездротовими аналогами. Таке підключення дозволяє передавати дані,



наприклад відео в режимі реального часу, і оперативно реагувати на зовнішні зміни, інформуючи про це користувача;

- LTE ("Довготривалий розвиток") – це стандарт мобільного широкопasmового зв'язку, який покращує потужність та швидкість бездротових мереж, підтримуючи при цьому мультикаст та ширококомвні потоки;

- Near Field Communication (NFC) включає в себе протоколи для обміну даними за допомогою електромагнітних полів. Ця технологія дозволяє двом пристроям взаємодіяти на відстані до чотирьох сантиметрів, часто використовується для безконтактних платежів, бронювання квитків та як ключі доступу;

- радіочастотна ідентифікація (RFID) застосовує електромагнітні поля для слідування за електронними мітками, що інакше недоступні для читання. Устаткування, що сумісне з RFID, забезпечує енергію та взаємодію з мітками для їх ідентифікації та перевірки на справжність;

- Wi-Fi / 802.11 є стандартним вибором для домашніх та офісних умов, характеризуючись економічністю, але має обмеження в діапазоні дії та споживанні енергії[11].

## 2.2. Аналіз пристроїв мережі IoT

Розглянемо компоненти, які входять до складу системи Інтернету речей:

- вбудовані системи: ці компоненти складаються з апаратного та програмного забезпечення, відповідаючи за специфічні функції у більшій системі. Вони базуються на мікропроцесорах або мікроконтролерах для виконання своїх задач;

- системи з власним інтелектом: ці елементи здатні обробляти дані та часто включають у себе мікроконтролери;

- мікроконтролери (MCU): це мініатюрні комп'ютери, інтегровані в мікросхеми, що оснащені процесором, оперативною та постійною пам'яттю. Вони призначені для вирішення простих завдань, але їх обчислювальні можливості обмежені порівняно з мікропроцесорами;

- мікропроцесори (MPU): центральні обчислювальні блоки, які можуть розміщуватися на одній або декількох інтегральних мікросхемах. Хоча для їхньої роботи потрібні додаткові периферійні пристрої, загальні витрати на обробку даних знижуються завдяки використанню тільки процесора;
- необчислювальні пристрої: ці елементи служать для встановлення з'єднань і передачі даних без здійснення обчислювальних операцій;
- перетворювачі: це фізичні пристрої, що переводять один вид енергії в інший. У контексті Інтернету речей, до них відносяться датчики та виконавчі механізми, які транслюють дані, відстежуючи взаємодію об'єктів з навколишнім середовищем[12].

### 2.3. Аналіз архітектури IoT

Для підбору відповідного устаткування та розуміння функціонування IoT важливим є аналіз архітектури Інтернету речей. При обговоренні IoT особлива увага приділяється його можливостям. Часто обговорюються можливості IoT у полегшенні нашого повсякденного життя, проте багато хто сумнівається у швидкому втіленні цих амбіційних планів.

Зміни в IoT відбуваються, але не стрімко, а поступово. Причиною цього є властиве IoT різноманіття систем, яке уповільнює розвиток і створює перешкоди у виконанні задач. Одна з основних проблем IoT (поряд з безпекою) – це фрагментація, яка є ключовою у Інтернеті речей через різноманітність об'єктів, які потрібно інтегрувати.

Для створення ефективної системи IoT необхідно інтегрувати різноманітне обладнання, програмне забезпечення та системи в єдину конструкцію для формування надійного та економічно вигідного рішення.

Простими словами, кожна реалізація IoT вимагає міцної архітектури для досягнення своїх цілей: успіх та придатність системи багато в чому залежить від якості розробленої інфраструктури.

### 2.3.1. Основні складові архітектури IoT

Хоча кожна система Інтернету речей (IoT) унікальна, вони всі базуються на схожій структурі архітектури та мають спільні елементи в обробці даних. "Речі" - об'єкти, підключені до Інтернету, які оснащені датчиками та виконавчими механізмами для збору даних про оточення та потім передаються IoT-шлюзам.

Далі системи збору даних та шлюзи IoT обробляють велику кількість необробленої інформації, перетворюють її у цифрові формати, фільтрують і готують до аналізу. Третій рівень включає крайові обчислювальні пристрої, які займаються додатковою обробкою даних та їх розширеним аналізом. На цьому етапі можуть бути застосовані технології візуалізації та машинного навчання.

Завершальний етап полягає у передачі даних до центрів обробки даних, які можуть бути розміщені як у хмарі, так і локально. Тут дані зберігаються, керуються та проходять детальний аналіз для отримання корисної інформації.

Чотири ключові шари архітектури IoT було детально представлено на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Основні складові архітектури IoT

### 2.3.2. Сенсори та контролери

В основі будь-якої системи Інтернету речей лежать з'єднані пристрої, які є ключовими для забезпечення основної функції IoT, а саме збору даних. Для

зчитування фізичних показників з навколишнього середовища або безпосередньо з самого об'єкта, цим пристроям необхідні датчики (рис. 2.2).

Ці датчики можуть бути інтегровані безпосередньо в пристрої або розроблені як окремі елементи, що здійснюють вимірювання та збір телеметричних даних.

Розглянемо, наприклад, аграрні датчики, основна функція яких – вимірювання параметрів, таких як температура та вологість повітря і ґрунту, рівень рН ґрунту, а також аналіз впливу сонячного випромінювання на посіви.

Один із ключових компонентів цієї системи – це виконавчі пристрої. Вони працюють у злагодженому тандемі з сенсорами та перетворюють інформацію, яку надають інтелектуальні елементи, в реальні дії.

Дослідимо автоматизовану систему зрошення з усіма потрібними сенсорами. Засновуючись на даних від сенсорів, ця система в реальному часі оцінює ситуацію та видає команди приводам відкрити певні водяні клапани у місцях, де рівень вологості ґрунту є нижчим за задану норму.

Ці клапани залишаються відчиненими до моменту, коли сенсори сигналізують про повернення до нормальних показників. Все це відбувається автоматично, без будь-якого втручання людини.

Основною важливістю є здатність під'єднаних пристроїв не тільки взаємодіяти у двосторонньому порядку з відповідними шлюзами або системами збору даних, але й взаєморозпізнавати та спілкуватися між собою для збору, обміну інформацією та співробітництва в реальному часі, що використовує потенціал усієї мережі.

Зокрема, коли мова йде про обмежені ресурси та батарейні пристрої, реалізація цього стає складним завданням, адже подібний зв'язок потребує значних обчислювальних ресурсів та споживає цінну енергію та пропускну спроможність.

Тому ефективне управління пристроями можливе тільки з надійною архітектурою, яка використовує спеціалізовані, безпечні та економічні протоколи зв'язку, такі як Lightweight M2M.

Цей протокол став провідним стандартом для управління легкими пристроями з низьким споживанням енергії, характерними для багатьох сценаріїв IoT.



Рисунок 2.2 – Шлюзи та збір даних

### 2.3.3. Шлюзи та збір даних

Хоча цей компонент IoT системи розташовується в безпосередній близькості до сенсорів та актуаторів на певних пристроях, важливо виділити його як самостійний рівень в архітектурі IoT.

Це ключовий елемент для збору, фільтрації та передачі даних до периферійної інфраструктури та хмарних сервісів. В контексті масового впровадження мільйонів пристроїв, здатність ефективно збирати, відбирати та транспортувати дані стає критичною.

Шлюзи та системи збору даних, які діють як посередники між IoT пристроями та хмарними та аналітичними сервісами, відіграють важливу роль у забезпеченні цього процесу, створюючи необхідну вузлову точку (рис. 2.3).

Розташовані на кордоні між OT та IT сферами, шлюзи спрощують комунікацію між датчиками та іншими елементами системи, перетворюючи дані сенсорів на формати, придатні для передачі та використання в системі. Вони також виконують роль контролерів, фільтрів та селекторів даних, зменшують



обсяг інформації, яка потребує передачі до хмари, тим самим оптимізують витрати на мережеву передачу та час реагування.

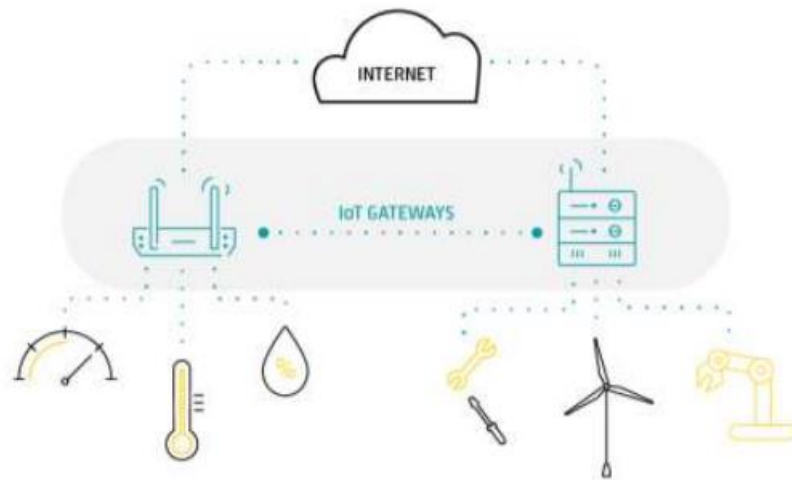


Рисунок 2.3 – Шлюзи та системи збору даних

Шлюзи також служать платформою для локальної обробки даних сенсорів, перетворюють їх у компактні пакети, готові до подальшої обробки. Окрім цього, шлюзи відіграють важливу роль в організації безпеки, керуючи потоком інформації в обидві сторони та використовуючи методи шифрування та захисту для попередження витоку даних та зниження ризику зовнішніх кібератак на IoT пристрої.

#### 2.3.4. Центр обробки даних

У світі Інтернету речей, датчики функціонують як нейрони, в той час як шлюз служить основою. Хмарний обчислювальний сервіс, в цьому контексті, виступає як мозок, відповідаючи за обробку та аналіз значних масивів інформації. На відміну від локальних обчислювальних систем, центральний сервер або хмара призначені для ефективного управління даними, застосовують складні алгоритми аналізу даних та інструменти машинного навчання, які перевершують можливості локальних систем (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Центр обробки даних

Останніми роками, зі зростанням популярності хмарних технологій, особливо в промисловому сегменті IoT, спостерігається поліпшення продуктивності, зменшення непередбачених простоїв та зниження енергоспоживання, що принесло численні переваги для бізнесу[13].

#### 2.4. Використання IoT у промисловості на прикладі розумних фабрик

Розумна фабрика обертається навколо ключових функцій, які відіграють важливу роль у підвищенні продуктивності системи, скороченні часу простою збірки, передбаченні та адаптації до змін у більш широкій мережі.

Ці функції дозволяють виробникам мати покращену видимість своїх активів і дають їм змогу долати виклики, з якими стикаються заводські системи. Таким чином, можна легко досягти підвищення продуктивності, ефективності та більшої сприйнятливості до змін у вимогах постачальників і клієнтів.

##### 2.4.1. Підключення та оптимізація розумної фабрики

Взаємопов'язаність інтелектуальної фабрики є найважливішим джерелом цінності. На підключеному інтелектуальному заводі активи, інтегровані з мережами Wireless Sensor Network (WSN), постійно отримують набори даних з джерел, гарантуючи, що дані відображають поточні умови.

Завдяки внесенню даних в бізнес-системи можна отримати комплексне уявлення про процеси ланцюга поставок, що сприяє підвищенню загальної

ефективності мережі поставок. Аналогічно, зменшення ручного втручання та підвищення надійності досягається за допомогою правильно оптимізованого "розумного" заводу.

Автоматизовані робочі процеси, покращене відстеження та ефективне використання енергії дозволяють фабриці підвищити продуктивність, час безвідмовної роботи та якість, а також зменшити витрати і втрати.

Спритність і гнучкість розумної фабрики дозволяють організації підлаштовуватися під графік і модифікації продукції з якомога меншим втручанням людини. Здатність до самоконфігурації та самосвідомості також є частиною просунутих розумних заводів.

Система може ідентифікувати обладнання та робочий процес і отримувати результати цих налаштувань в режимі реального часу. Спритність може підвищити час безвідмовної роботи та цінність за рахунок зменшення кількості переналаштувань внаслідок зміни продукту, підвищуючи точність.

Аналогічно, машини та інструменти максимізують свою продуктивність, безперервно працюючи до тих пір, поки вони не вийдуть з ладу. Проактивна система виявляє невідповідності, допомагає поповнювати запаси, виявляє та вирішує проблеми з якістю, одночасно контролює питання безпеки та технічного обслуговування.

Як результат, працівники та системи можуть прогнозувати та реагувати на проблеми до їх виникнення, а не реагувати на них після їх виникнення. Ця проактивна здатність "розумних" заводів може підвищити час безвідмовної роботи, продуктивність і якість, одночасно запобігає проблемам безпеки.

На "розумних" заводах, окрім датчиків, успішно впроваджено кілька додатків RFID. Ця технологія є життєво важливою для покращення декількох процедур автоматизації виробництва, від автоматичної ідентифікації предметів, інструментів та інших засобів, що використовуються на заводі, і до вхідних/вихідних керувань цими інструментами.

Початковою метою розробки цієї технології було відстеження та ідентифікація товарів у роздрібній торгівлі та логістиці. Однак вона була впроваджена для виробничих застосувань, в тому числі ланцюги поставок,

логістику та інші комерційно доступні системи. На додаток до RFID, хмарні обчислення є ще однією технологією, прийнятою на розумних фабриках.

#### 2.4.2. Функції самообслуговування на вимогу розумної фабрики

Функції самообслуговування на вимогу в хмарних обчисленнях мають важливе значення для підприємств для зниження витрат, забезпечення гнучкості системи і зростання доходів і ефективності.

Хмара пропонує стійке рішення для обчислювальних можливостей і зберігання даних, яке може бути покращене на вимогу. Величезні обсяги даних, що генеруються, можуть транспортуватися в хмару через кіберпростір під час операцій, звідки дані можуть передаватися в процеси.

Як наслідок, управління та оптимізація системи, в тому числі нагляд і контроль, можуть бути підтримані аналітикою великих даних. Сучасні емпіричні дослідження повідомляють про впровадження концепції "розумної фабрики" в електронній промисловості з використанням тривимірних сканерів, технологій Інтернету речей, повністю автоматизованого виробництва та інтегрованого управління машинами.

В результаті цього впровадження компанія отримала вигоду від скорочення часу виконання замовлення для споживачів і загальних витрат, а також підвищила виробничі потужності на 25%, в тому числі на 50% зменшилася кількість неякісної продукції.

Мережі WSN, особливо датчики, дозволяють "розумним" заводам спостерігати за явними процесами на підприємстві, підвищуючи розуміння того, що відбувається на різних рівнях. Наприклад, датчики вібрації можуть попередити, коли необхідно провести технічне обслуговування двигунів, підшипників або іншого обладнання.

Ці попередження стають сигналами для профілактичного обслуговування на заводах. WiMAX, Bluetooth і Wi-Fi – це мобільні платформи, які пропонують недорогі, високошвидкісні, безперервні з'єднання на "розумних" заводах.

### 2.4.3. Виклики в обробній промисловості

Оскільки фізичний світ оцифровується тривожними темпами, в останні роки спостерігається вибух смарт-пристроїв. Ці пристрої перебувають у безперервному зв'язку один з одним та створюють величезні обсяги даних.

Розумне програмне та апаратне забезпечення необхідне для того, щоб "розумний" завод міг безперервно виконувати операційні завдання в дуже складному виробничому середовищі.

Тим не менш, необхідно вирішити деякі технічні та нетехнічні проблеми, такі як дефіцит кваліфікованих робітників, відсутність підготовки з програмного та апаратного забезпечення, управління кризовими ситуаціями та ризиками.

Розумні машини є життєво важливими частинами "розумного" заводу. Завдяки передовим технологіям Інтернету речей, розумні машини мають бути автономними. Це означає, що розумним машинам необхідно приймати рішення самостійно, а не залежати від інструкцій, наданих людиною, консультуватися один з одним та з інтелектуальними продуктами.

Це показує, що автономні здібності машин є життєво важливими для самоорганізованих виробничих систем. Більшість дослідників вважають, що для досягнення автономної виробничої системи, а не ієрархічної, все ще потрібні додаткові дослідження в цій галузі.

Для механічної системи самосвідомість машини – це її здатність оцінювати свій стан і реагувати на результати оцінки. Стан машини в реальному часі може бути показаний контролеру та менеджеру машини для адаптивного управління та своєчасного обслуговування відповідно. Однак у виробничих системах, де задіяний парк машин, самосвідомості і самоорганізації ще далеко до реалізації.

Система "розумної фабрики" використовує теорію самоорганізації, а самоорганізований процес може спрямовувати непередбачувані ситуації, що призводять до хаосу. Тому для повного впровадження цих систем потрібні більш адаптивні та гнучкі підходи.



Великі дані та аналітика даних ілюструють набори даних та аналітичні інструменти в сучасних емпіричних дослідженнях. Ці масивні та складні інструменти потребують передових технологій зберігання, управління, аналізу та візуалізації даних. Хмарні обчислення допомагають успішно використовувати великі дані і забезпечують масштабовані обчислювальні можливості для виробничих систем.

Однак основною проблемою в обробці величезних обсягів даних в епоху цифрових технологій є нестабільне зовнішнє середовище. Багатогранне середовище характеризує виробничі галузі: несправність однієї з машин протягом декількох секунд може призвести до значних збоїв у роботі системи та операційних витрат.

Тому вкрай важливо зосередитися на практичному значенні даних, які розкривають аспекти, пов'язані з вартістю та продуктивністю, замість того, щоб збирати різні дані, а потім намагатися ними управляти.

Організації повинні бути готовими до вирішення проблем, пов'язаних з даними, які стосуються конфіденційності, ефективного аналізу даних, управління зберіганням і доступності.

Також, коли величезні обсяги інтелектуальних ресурсів об'єднуються в мережу для накопичення даних у хмарі – ризики кібербезпеки стають актуальними. Загрози, які можуть вплинути на персональні пристрої та складні ІТ-системи, виникають через ці кіберризики, роблячи людей та організації вразливими до фінансових та операційних збитків.

Аналогічно, витік даних із системи може бути настільки ж шкідливим, як і недостатній збір даних з інтелектуальної системи. Отже, захист необхідний для систем і комунікацій, оскільки багато систем взаємодіють на величезних відстанях, що робить їх вразливими до порушень безпеки. Розумні мережі є одним з провідних прикладів передових технологій Інтернету речей у промислових системах.

Безперервна еволюція "розумних" заводів змінює роль працівників у порівнянні з тим, що вони роблять на традиційних підприємствах. Автоматизація візьме на себе повторювані, рутинні завдання або вплине на дефіцит робочої

сили та людей на цих підприємствах. Аналогічно, спеціальні навички та знання стануть обов'язковими.

Наприклад, ІТ-менеджери, які не мають досвіду роботи в інтелектуальному виробничому середовищі, стикаються з труднощами у досягненні цілей, а старіння робочої сили вплине на багато галузей у майбутньому. Емпіричні дослідження також передбачали величезний розрив у навичках, що утворився між досвідченими та кваліфікованими працівниками. Таким чином, критично важливо зафіксувати знання, накопичені старшими працівниками, поширити їх і зробити доступними для нової робочої сили до виходу на пенсію.

ІоТ – це складна мережа фізичних пристроїв, оснащених датчиками і приводами. Ці датчики дають змогу з'єднуватися та обмінюватися даними. Ці пристрої потребують потужності та енергії для виконання завдань зондування, обробки, зв'язку та моніторингу в додатках ІоТ. Однак зв'язок між пристроями для передачі даних залишається найбільш енергоємним. Тому дуже важливо тримати витрати на енергію під контролем, наприклад, зменшуючи енергоспоживання радіостанцій при створенні підключеного продукту.

Аналогічно, портативні та автономні пристрої будуть живитися від батареї або збирати енергію. Цифрові технології використовують пристрої з низьким енергоспоживанням і стають більш енергоефективними, проте кількість підключених пристроїв постійно зростає.

Більше того, поширення підключених пристроїв збільшує мережевий трафік, а отже, збільшує витрати на енергію додаткового мережевого обладнання, необхідного для підтримки цього сплеску трафіку.

Незалежно від непередбачуваних ситуацій, довіра має вирішальне значення для переконання людей прийняти сучасні технології. Довіра допомагає користувачам розпізнавати соціальне оточення технології в невизначених ситуаціях, зменшуючи вразливість.

Оскільки довіра може впоратися з невизначеністю та ризиком вразливості систем Інтернету речей, вона вважається вирішальною для прийняття

користувачами. Це дозволяє користувачам взаємодіяти з взаємопов'язаними пристроями та системами Інтернету речей безпечно, надійно та спонтанно.

Дослідження показали, що довіра посилює поведінкові наміри людей щодо використання продуктів і послуг Інтернету речей. І навпаки, відсутність довіри може виявитися перешкодою для поширення IoT серед людей [11].

## РОЗДІЛ 3 МЕТОДОЛОГІЯ ПОКРАЩЕННЯ ДАТЧИКІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У СИСТЕМІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

### 3.1. Сенсорні загрози для ІОТ-пристроїв з датчиками магнітного поля

Оскільки існуючі системи управління сенсорами та схеми безпеки не можуть забезпечити належний рівень захисту сенсорів, зловмисники можуть використовувати ці сенсори різними способами. У цьому розділі ми розглянемо загрози на основі сенсорів на пристроях Інтернету речей та проаналізуємо існуючі сценарії атак, підтверджені дослідниками.

Загалом, сенсорні загрози - це пасивні або активні зловмисні дії, які намагаються реалізувати свої зловмисні наміри, використовуючи датчики. Сенсорні загрози можуть бути пасивними, наприклад, спостерігати за поведінкою пристрою, не перешкоджаючи нормальній роботі пристрою, або активними, наприклад, вводити фальшиві дані з датчиків, передавати шкідливий сенсорний код на пристрій.

Крім того, сенсорні загрози в пристроях Інтернету речей можна розділити на чотири великі категорії залежно від мети і характеру загроз. Це такі категорії:

- витік інформації;
- передача шкідливих шаблонів або команд датчиків;
- введення неправдивих даних датчиків;
- відмова в обслуговуванні.

Ці загрози описані нижче.

#### 3.1.1. Загроза “Висновок за натисканням клавіш”

Типова для пристроїв ІоТ. Більшість пристроїв Інтернету речей мають засоби введення, такі як сенсорний екран, тачпад, клавіатура (зовнішня або вбудована віртуальна чи реальна). Кожного разу, коли користувач вводить або вводить дані на пристрої, пристрій нахилиється і повертається, що створює

відхилення в даних, записаних датчиками (наприклад, акселерометром, гіроскопом, мікрофоном, датчиком освітленості і т.д.). Ці відхилення в даних датчиків можуть бути використані для виведення натискань клавіш на пристрої IoT. Висновок про натискання клавіш може виконуватися на самому пристрої або на сусідньому пристрої за допомогою датчиків пристрою IoT.

Електромагнітні випромінювання від клавіатури можуть бути використані для висновку про введення даних з комп'ютера. Оскільки магнітні датчики пристроїв IoT чутливі до електромагнітних випромінювань, вони можуть бути використані як середовище атаки.

Дослідники IoT показали, що як дротова, так і бездротова клавіатури випромінюють електромагнітні сигнали, коли користувач вводить текст, і цей сигнал може бути додатково оброблений, щоб зробити висновок про натискання клавіш. У цьому методі електромагнітне випромінювання вимірюється магнітним датчиком пристрою Інтернету речей, коли натискається клавіша, і, використовуючи техніку переходу по спадаючому фронту, зломисник може зробити висновок про натискання клавіш.

### 3.1.2. Загроза “Виведення завдань”

Відноситься до типу атаки, яка розкриває інформацію про поточне завдання або додаток в пристрої IoT. Виведення завдань розкриває інформацію про стан пристрою, і зломисники можуть відтворити цей стан пристрою, щоб запустити атаку без попередження політик безпеки, впроваджених на пристрої. Датчики, пов'язані з пристроями IoT, показують відхилення в показаннях для різних завдань, що виконуються на пристроях. Це відхилення в показаннях може бути використано для висновку про процес, що виконується всередині пристрою, а також про його застосування.

Магнітні датчики в пристроях Інтернету речей мають фіксувати орієнтацію пристрою по відношенню до магнітного поля Землі. Дані, записані магнітним датчиком, змінюються в присутності зовнішнього магнітного поля в периферії пристрою.

Це відхилення в даних може бути використано для ідентифікації завдань, що виконуються на пристрої. Багато пристроїв IoT мають запам'ятовуючий пристрій, і щоразу, коли дані записуються або зчитуються з цього запам'ятовуючого пристрою, можна спостерігати зміну в показаннях магнітного датчика. Магнітні датчики IoT-пристроїв можуть використовуватися не тільки для зчитування інформації з самого пристрою, але також можуть бути використані як середовище для отримання інформації з сусіднього пристрою.

Дослідники IoT показали, що магнітний датчик смартфона може бути використаний для визначення поточних завдань у накопичувачах, таких як жорсткі диски комп'ютерів і серверів.

Коли програма працює на комп'ютері, жорсткі диски генерують магнітне поле, яке можна відчувати за допомогою магнітного датчика смартфона. Різні дії викликають певні показники на магнітному датчику, які можуть бути використані для відстеження дій користувачів.

Це може розглядатися як серйозна загроза для пристрою, і зловмисники можуть таким чином отримати цінну інформацію. Електромагнітне (ЕМ) випромінювання є поширеним явищем для пристроїв IoT.

Електромагнітні випромінювання виникають щоразу, коли через пристрій проходить струм і на ньому виконується завдання. Атаки електромагнітної еманції також можна спостерігати в пристроях IoT на базі програмованих вентильних матриць(FPGA).

Зловмисники можуть записувати дані про електромагнітне випромінювання, що генерується пристроями Інтернету речей на базі FPGA щоб визначити, який саме додаток працює в системі, а також стани логічних блоків пристроїв.

Такі витoki інформації роблять систему вразливою для користувача. Смарт-картки також випромінюють електромагнітні хвилі під час виконання різних завдань, які можуть бути вловлені радіочастотною (РЧ) антеною, і з випромінювання можна зробити висновок про завдання.



### 3.1.3. Загроза “Передача шкідливих команд датчиків”

Датчики, доступні в пристроях Інтернету речей, можуть бути використані для передачі шкідливих шаблонів датчиків або команд запуску для активації шкідливого програмного забезпечення, яке могло бути імплантоване в пристрій жертви.

Датчики можуть використовуватися для створення неочікуваних каналів зв'язку між периферійними пристроями. Такі канали можуть бути використані для зміни критичних параметрів датчиків (наприклад, руху пристрою, інтенсивності світла, магнітного поля тощо) або для передачі шкідливих команд.

Магнітні датчики пристроїв IoT чутливі до магнітних полів периферійних пристроїв. Змінюючи магнітне поле оточення пристрою, можна легко змінити показання магнітного датчика, що може бути використано як повідомлення для запуску шкідливого програмного забезпечення.

Тригерні повідомлення, закодовані електромагнітом, можуть бути надіслані на IoT-пристрій, і в результаті цього повідомлення в показаннях магнітного датчика пристрою виникнуть певні відхилення.

Ці відхилення можна обчислити, і з цього електромагнітного сигналу можна виокремити тригерне повідомлення. Більше того, відхилення магнітного поля можна обчислити по осях  $x$ ,  $y$  і  $z$ , і різні значення відхилень магнітного поля можна інтерпретувати як різні тригерні повідомлення[13].

## 3.2. Існуючі механізми безпеки для запобігання сенсорним загрозам

Дослідники визначили різноманітний набір сенсорних загроз для пристроїв Інтернету речей. Незважаючи на те, що існує декілька загроз, комплексного механізму безпеки, здатного запобігти таким загрозам, ще не розроблено.

Дійсно, використання широкого спектру датчиків в пристроях і додатках Інтернету речей ускладнює захист всіх датчиків за допомогою однієї ефективної системи. Крім того, брак знань про існуючі сенсорні загрози і відмінності в

характеристиках сенсорів ускладнюють створення повного і всеосяжного заходу безпеки для захисту всіх сенсорів пристроїв IoT від сенсорних загроз. Було розглянуто два основні підходи, запропоновані дослідниками в спробі розробити механізми захисту від сенсорних загроз на пристроях IoT.

Одним з підходів до захисту датчиків в пристроях IoT є вдосконалення існуючих систем управління датчиками в операційних системах IoT. Наприклад, дослідники IoT запропонували розширення системи управління датчиками Android під назвою Semadroid, яка надає користувачам функцію моніторингу та ведення журналу, щоб зробити використання датчиків додатками явним.

За допомогою Semadroid користувачі можуть визначати політики, щоб контролювати, чи можуть сторонні додатки отримати доступ до даних, отриманих за допомогою сенсорів, і з якою точністю. Semadroid створює фіктивні дані для перевірки того, як додатки невідомих виробників використовують дані з датчиків, і таким чином запобігає зловмисній поведінці.

Крім того, розробники систем вже давно борються з проблемою визначення того, як дозволити користувачеві контролювати, коли додатки можуть безпечно та ефективно виконувати операції з чутливими до конфіденційності датчиками.

Сучасні комерційні системи вимагають від користувачів одноразового дозволу на такі операції (наприклад, під час встановлення або першого використання), але шкідливі програми можуть зловживати такими дозволами для прихованого збору даних за допомогою таких датчиків.

Запропоновані методи дослідження дозволяють системам робити висновки про операції, пов'язані з подіями введення користувача, але зловмисні програми все одно можуть обманом змусити користувачів дозволити неочікувані, приховані операції.

Щоб запобігти обману користувачів, дослідники IoT запропонували прив'язувати запити додатків на виконання операцій до пов'язаних з ними подій введення користувача та способів отримання таких подій, що дозволить користувачам однозначно санкціонувати операції на чутливих до конфіденційності сенсорах.

Щоб продемонструвати це рішення, вони впровадили систему авторизації AWare для Android, розширивши проміжне програмне забезпечення Android для контролю доступу до чутливих до конфіденційності сенсорів. Вони оцінили ефективність AWare у:

- лабораторному дослідженні користувачів, яке показало, що максимум 7% користувачів були обмануті прикладами чотирьох типів атак при використанні AWare, замість 85% в середньому для попередніх підходів;
- польовому дослідженні, яке показало, що зусилля користувача з авторизації збільшуються лише на 2,28 рішення в середньому на додаток;
- дослідженні сумісності з 1000 найбільш завантажуваних додатків для Android, яке продемонструвало, що такі додатки можуть ефективно працювати в рамках AWare.

Крім того, альтернативний механізм запропоновано в 6thSense, де дослідники запропонували контекстно-орієнтовану структуру для виявлення сенсорних загроз у пристроях Інтернету речей.

Цей фреймворк побудований на спостереженні, що при будь-якій активності користувача на пристрої Інтернету речей активується певний набір датчиків. 6thSense будує комплексну контекстно-орієнтовану модель для кожної дії користувача на основі цього спостереження.

На відміну від інших робіт, 6thSense використовує всі дані датчиків в режимі реального часу і визначає, чи є поточний контекст датчиків зловмисним чи ні, використовуючи різні підходи на основі машинного навчання.

Дослідники протестували запропонований фреймворк на 50 реальних даних користувачів і підтвердили, що 6thSense може виявляти різні загрози на основі сенсорів з точністю приблизно 97% і F-рахунком.

Іншим підходом до захисту пристроїв Інтернету речей від сенсорних загроз є захист даних, що зчитуються під час передачі та в стані спокою. Дійсно, деякі шкідливі програми записують дані датчиків і передають їх пізніше, коли пристрій заблоковано або коли механізми захисту вимкнено.

Наприклад, дані про місцезнаходження можуть стати об'єктом атак зловмисників, які прагнуть отримати конфіденційну інформацію про

місцезнаходження, наприклад, про місце проживання або роботи жертви, для здійснення різноманітних атак.

Механізми збереження конфіденційності даних про місцезнаходження (Location-Privacy Preserving Mechanisms, LPPM) існують для того, щоб зменшити ймовірність успіху атак на дані про місцезнаходження на основі висновків.

Однак такі механізми виявляються менш ефективними, коли супротивнику відомо про застосований механізм захисту, також відомий як атаки з використанням "білої скриньки" (white-box attacks). Дослідники IoT запропонували новий підхід, який використовує цілеспрямовані маневри для доповнення реальних даних датчиків синтетичними даними та отримання рівномірного розподілу точок даних, що створює надійний захист від атак "білої скриньки".

Такі маневри систематично активуються у відповідь на певні події в системі для швидкого та безперервного контролю швидкості зміни конфігурацій системи та збільшення різноманітності в просторі зчитувань, що зменшує ймовірність успіху інференційних атак з боку супротивника.

Експериментальні результати, виконані на реальному наборі даних, показали, що застосування таких маневрів знижує ймовірність успіху атак "білого ящика" в середньому до 3% порівняно з 57% при використанні найсучасніших LPPM.

Крім того, атаки на основі аналізу потужності та електромагнітної емісії використовують інформацію про енергоспоживання та електромагнітні випромінювання активних датчиків пристрою. Одним із запропонованих заходів протидії атакам електромагнітної еманациї є використання одноінверторного кільцевого генератора (SIRO).

У цій запропонованій системі використовується мультитактова система з шифруванням з синхронізацією на основі SIRO. Відсутність зовнішнього генератора і несинхронізована природа SIRO робить систему більш стійкою до електромагнітних випромінювань.

Знову ж таки, система на основі SIRO забезпечує схему стрибкоподібної зміни частоти в шифрі, що підвищує стійкість до атак на синхронізацію та аналіз

потужності. Дослідники IoT запропонували підхід для мінімізації впливу атаки аналізу потужності, який базується на кореляції між вимірюваннями енергоспоживання та простим прогнозом, розробленим на основі кількості бітових переходів в пристроях.

Використання випадкових попередніх зарядів у пристроях може мінімізувати ймовірність атаки аналізу потужності на пристрої IoT на основі ПЛІС. Також були запропоновані більш загальні рішення для захисту даних, що надходять від датчиків. Дослідниками було запропоновано використовувати шифрування з відкритим ключем для захисту сенсорних даних з пристроїв.

Рекомендовано шифрувати зібрані сенсорні дані та зберігати їх у пристрої перед тим, як передавати їх стороннім додаткам або іншим пристроям. Пристрої, підключені один до одного, можуть обмінюватися своїми відкритими ключами через систему управління ключами і використовувати призначені їм закриті ключі для розшифрування сенсорних даних.

Сторонні програми, встановлені на пристрої, також можуть використовувати схему шифрування з відкритим ключем для використання даних датчиків у різних додатках.

Системи управління довірою також можна використовувати для безпечного обміну інформацією між датчиками, безпечної передачі даних датчиків з іншими пристроями та для сертифікації авторизованого доступу до датчиків за допомогою довіреного програмного забезпечення та додатків у системі. Фреймворки управління довірою можуть надмірно обробляти запити до сенсорів і приймати рішення на основі того, чи є ці запити законними чи ні.

Наприклад, фреймворк під назвою AuDroid був запропонований для захисту зв'язку через аудіоканали, коли додатки використовують мікрофони та динаміки пристрою.

AuDroid використовує модуль ядра SELinux для створення еталонного монітора, який застосовує політики контролю доступу до динамічно створених аудіоканалів. Він контролює інформаційні потоки через аудіоканали та сповіщає користувачів про створення аудіоканалу між процесами під час виконання.

Хоча вищезгадані рішення спрямовані на боротьбу з сенсорними загрозами, все ще існують обмеження, які необхідно подолати:

- більшість запропонованих механізмів безпеки для пристроїв IoT - це системи виявлення аномалій на рівні додатків, які не підходять для виявлення сенсорних загроз на системному рівні. Було проаналізовано ефективність декількох сенсорних загроз у порівнянні з реальними сканерами шкідливого програмного забезпечення, доступними на веб-сайті VirusTotal, і виявили, що жоден сканер не може розпізнати сенсорні загрози;

- зі зростанням популярності концепції Інтернету речей все більше і більше пристроїв з'єднуються між собою, і безпекою цих пристроїв стає складно керувати. Багато пристроїв IoT мають дуже обмежені ресурси, є невеликими пристроями, і складно реалізувати складний механізм безпеки, враховуючи обмеженість ресурсів пристроїв;

- запропоновані механізми безпеки націлені лише на підмножину чутливих датчиків, доступних сьогодні в пристроях IoT. Наприклад, комерційні системи управління датчиками використовують явну модель безпеки на основі дозволів лише для деяких датчиків (наприклад, камери, GPS та мікрофону). Аналогічно, AuDroid надає фреймворк на основі політик для явного захисту аудіо-сенсорів пристроїв Інтернету речей. Однак такий фреймворк не був розроблений для захисту інших чутливих сенсорів. Інші запропоновані рішення забезпечують лише захист від аналізу потужності та атак на основі електромагнітної еманации. Крок вперед було зроблено завдяки AWare та bthSense, які охопили ширший набір чутливих до конфіденційності датчиків, доступних у сучасних пристроях Інтернету речей, для побудови контекстно-залежної моделі та визначення чи є сценарій використання датчика зловмисним;

- у рішеннях, де рішення користувачів використовуються для побудови політики використання датчиків для сторонніх додатків, наприклад, в Semadroid і AWare, якщо користувач дозволяє додатку використовувати датчик без будь-яких обмежень, то такий додаток сліпо розглядається системою як безпечний;



– шифрування даних датчика за допомогою схем шифрування з відкритим ключем забезпечує захист даних датчика, але воно також споживає багато енергії для роботи в невеликих пристроях IoT. Такий компроміс між енергоспоживанням та продуктивністю є недоцільним для пристроїв IoT з обмеженими ресурсами.

На закінчення, повне і комплексне рішення для автономного застосування політик, всебічного охоплення всіх датчиків і ефективного компромісу між енергоспоживанням і продуктивністю ще належить розробити[14].

### 3.3. Покращення роботи датчиків магнітного поля за допомогою нанодіелектриків

У зв'язку з постійно зростаючим занепокоєнням щодо здоров'я людини та прагненням контролювати пристрої, що застосовуються в енергетичному Інтернеті на основі IoT, волоконно-оптичні датчики магнітного поля на основі нанодіелектриків стають важливою темою.

Однак, через свою складну структуру, сильні електромагнітні перешкоди, високу вартість і великий об'єм, традиційні магнітометри, засновані на принципі магнітометра, ефекті магнітоопору і потоковому затворі, вже не є придатними для наступного покоління інтелектуальних пристроїв в інтелектуальних електромережах.

Для вирішення цих проблем чудовим рішенням може стати створення різноманітних технологій оптичного зондування, здатних виявляти магнітні поля в різних сферах – від біомедицини до енергетичного Інтернету на основі IoT.

За останні кілька десятиліть було запропоновано кілька волоконно-оптичних сенсорів для виявлення магнітного поля, заснованих на різних принципах роботи, а саме: волоконна решітка Бреґга (ВРБ), інтерферометрія Фабрі-Перо (ІФП), інтерферометрія Маха-Цендера (ІМЦ) і поверхневий плазмонний резонанс (ППР).

Традиційні оптичні волокна зазвичай виготовляються з кварцового скла або полімеру, які є ізоляційними матеріалами і не піддаються впливу електричних і магнітних сигналів.

Крім того, обговорюються підсумки і перспективи подальшого розвитку чутливих матеріалів на основі нанодіелектриків і методи подальшого поліпшення властивостей сенсорів.

### 3.3.1. Характеристики магніточутливих наноматеріалів

Магніточутливі матеріали, як одні з найважливіших і основних функціональних матеріалів, здатні перетворювати магнітні сигнали в електричні, що завжди є оптимальним вибором для оптичних сенсорів.

Функціональні матеріали поділяються на три категорії:

- магнітострикційні матеріали з магнітомеханічними характеристиками перетворення;
- матеріали з рідинною текучістю і твердим магнетизмом
- магнітооптичні матеріали, які можуть реалізовувати взаємодію світла, електрики і магнетизму, як показано на рисунку 3.1.

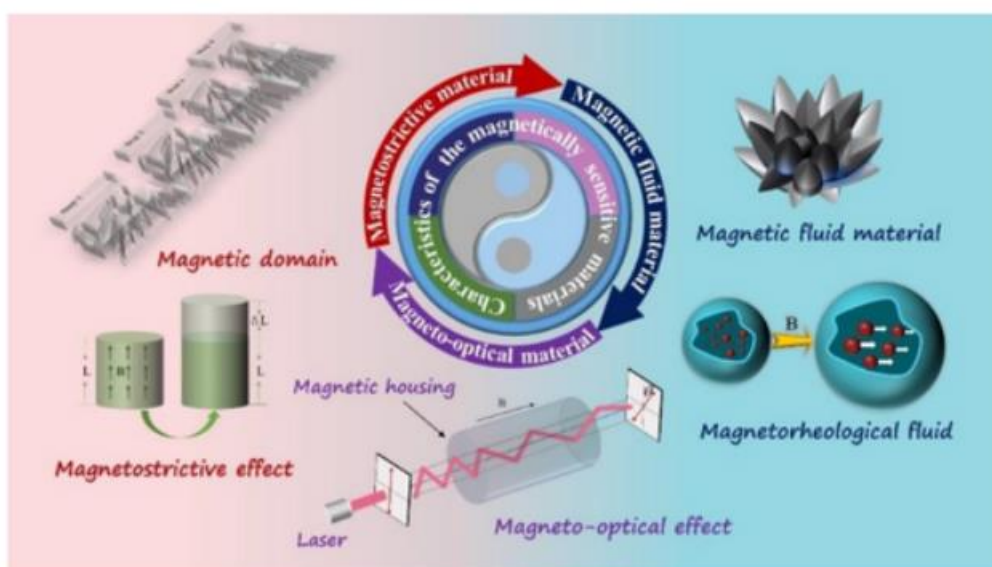


Рисунок 3.1 – Принципи роботи різних магніточутливих матеріалів

Магніострикційний ефект (МСЕ) – це оборотна деформація геометричних розмірів матеріалу внаслідок зміни зовнішнього магнітного поля під час намагнічування, яку вперше відкрив Джоуль у 1842 році. Орієнтація анізотропних магнітних доменів залежить від взаємодії магнітної та механічної енергії. Згодом Віллари виявив, що намагніченість змінюється залежно від напруги, прикладеної до магніострикційних матеріалів.

Залежно від різних структур і функціональних груп, магніострикційні матеріали зазвичай поділяються на металеві магніострикційні матеріали та феритові магніострикційні матеріали. Як важливий фактор, що впливає на розтяжність магніострикційних матеріалів, пластичність сплаву Fe-Ga перевершує терфенол-D.

Більше того, магніострикція 280 ppm може бути отримана при насиченій намагніченості в 1,5Тл. МСЕ може реалізувати детектування слабого магнітного поля до 1 мТл на основі гнучких матеріалів, таких як сплав Fe-Ga.

Велика і чутлива магніострикція потрібна магніострикційним матеріалам, щоб задовольнити різноманітні вимоги застосувань, але важко отримати високу магніострикцію і низьке поле перемикавання.

Осадження нанодисперсних тетрагональних частинок було досягнуто шляхом старіння прекурсору для отримання феромагнітних композитів з вищим коефіцієнтом магніострикції.

Тим часом, більша магніострикція була індукована ізотермічним процесом старіння та гартуванням у крижаній воді, з якого можна було отримати параметр магніострикції насичення 340 ppm.

Крім того, деякі сучасні аморфні сплави, такі як Metglas і FeSiB, широко застосовуються і придатні для виготовлення чутливих компонентів для задоволення різних потреб, таких як збирання енергії, а також виявлення магнітних полів спеціальної частоти.

Хоча постійний прогрес матеріалів сприяє розвитку сенсорів, застосування магніострикційних матеріалів у деяких спеціальних галузях все ще має обмеження, таких як цільова доставка ліків, діагностика та терапія.

Через відсутність комплексних і систематичних досліджень з біобезпеки біосумісності магнітострикційних матеріалів, а також через недостатню текучість, їх важко застосовувати для доставки ліків, лікування та в інших сферах.

Магнітна рідина – це один з різновидів нанодіелектричної рідини, яка є високостабільним колоїдним матеріалом, що включає ферромагнітні наночастинки, вкриті поверхнево-активною речовиною, розсіяні у відповідному рідкому носії (рис. 3.2).

Він володіє як магнітними властивостями, так і плинністю. Магнітні наночастинки, хаотично розподілені в магнітному полі, під дією електричного поля збираються і утворюють ланцюжки вздовж напрямку магнітного поля, що в кінцевому підсумку призводить до зміни показника заломлення світла.

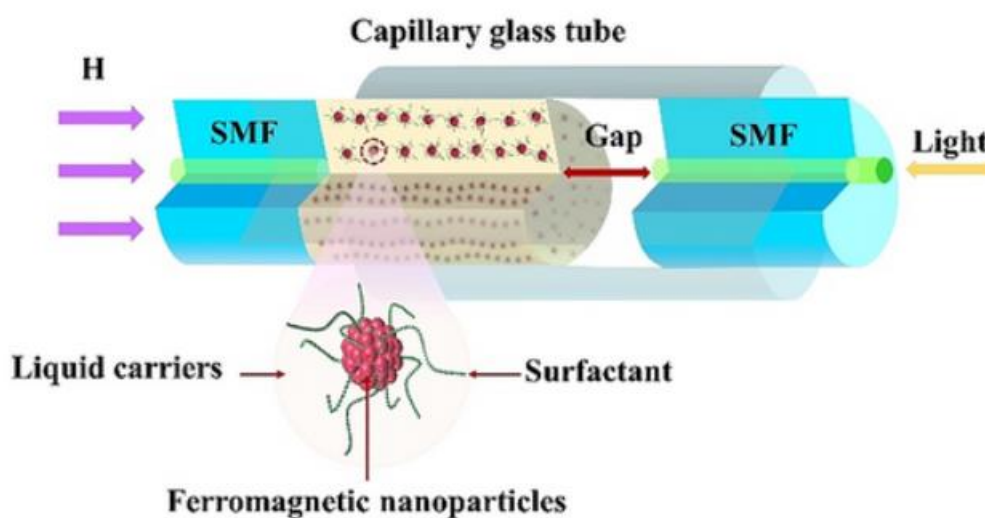


Рисунок 3.2 – Структура датчику магнітного поля на основі магніто-об'ємного ефекту

В останні роки матеріали, пов'язані з магнітним полем, привертають все більше уваги в оптиці та біомедицині. Вводячи магнітне поле в оптичний сенсор, можна регулювати вихідну інтенсивність світла, змінюючи напруженість зовнішнього магнітного поля.

На рисунку 3.2 показано ДМП, заповнений магнітним полем, що складається з феромагнітних частинок розміром близько 10 нм. Під дією однорідного магнітного поля об'єм магнітного поля змінюється, що призводить до зміни довжини порожнини в капілярній скляній трубці. Досягнута чутливість ДМП становить 268,81 пм/Гс в межах 15,5-139,7 Гс.

Магнітне також може застосовуватися в біомедичній гіпертермії. Магнітне поле розташовується до клітин пухлини, а ДМП на основі фериту поглинає енергію зовнішніх електромагнітних хвиль і перетворює її в теплову енергію. Зрештою, ділянка пухлини нагрівається і вбиває пухлинні клітини, що дозволяє досягти мети лікування.

Крім того, магнітне поле, що використовується для таргетованої доставки ліків, може точно орієнтуватися на пухлинні клітини, зменшуючи при цьому концентрацію препарату в нормальних клітинних тканинах.

Наночастинки придатні для доставки через уникнення фагоцитозу макрофагів у кровообігу. Таким чином, наноліки, інкорпоровані наночастинками, можуть ефективно розчиняти тромб та інгібувати утворення артеріального тромбу.

Магнітооптичний ефект - це фундаментальне фізичне явище, при якому характеристики пропускання світлових хвиль змінюються залежно від електромагнітних характеристик матеріалів під дією зовнішнього магнітного поля. Після проходження через МО-скло, поміщене в зовнішнє магнітне поле, світло лінійно поляризується.

Магнітооптичні матеріали, такі як InAs,  $\text{EuCd}_2\text{As}_2$ , демонструють сильний магнітооптичний ефект від ближнього до далекого інфрачервоного діапазону. Відповідно до типу матеріалів, їх можна класифікувати на магнітооптичне скло, магнітооптичний кристал та магнітооптичну прозору кераміку.

Прозора магнітооптична кераміка має надзвичайні властивості високої постійної Верде і відмінну теплопровідність, що робить її одним з найоптимальніших матеріалів для ізоляторів Фарадея у потужних лазерах.

Тривимірний волоконно-оптичний векторний ДМП на основі магнітооптичного кристала може реалізувати вимірювання просторового

вектора магнітного поля. Датчик має чудову роздільну здатність 0,2 мкТл і кутову роздільну здатність  $0,5^\circ$  в діапазоні понад 20 мкТл.

Використовуючи перевагу низького розсіювання магнітооптичних функціональних матеріалів, за допомогою більш товстої плівки, поляризація магнітного поля використовується для посилення магнітооптичного відгуку нанокompозиту для покращення чутливості. Чутливість всеволоконного магнітометра з шумовим еквівалентом становила  $50 \text{ нТл/Гц}^{1/2}$ .

Таким чином, магнітооптичні матеріали мають великий потенціал у топологічній та квантовій фотоніці. З іншого боку, надвисока константа Верде є перспективною для дослідження 2D функціональних мінералів, магнітних наночастинок з полімерним покриттям та магнітооптичної кераміки  $\text{Tb}_{2.45}\text{Hf}_2\text{O}_{7.68}$ . Тим часом, відкриття магнітооптичного ефекту Фарадея графену на кремнієвих підкладках ще більше прискорило розвиток магнітооптичних функціональних матеріалів.

### 3.3.2. Методи вимірювання магнітного поля на основі нанодіелектриків

Оптоволоконні мультислоконні системи (МС) були запропоновані вже півстоліття тому. Принципи роботи в основному охоплюють ВРБ, ІФП, ІМЦ та ППР. Чотири основні принципи показані на рисунку 3.3.

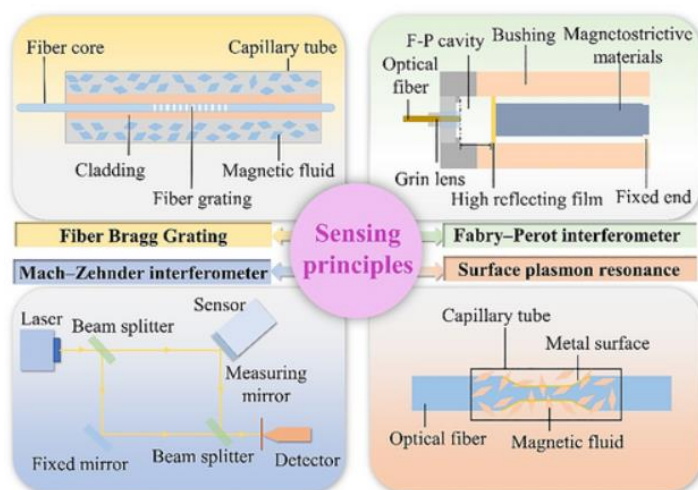


Рисунок 3.3 – Оптичні методи вимірювання магнітного поля

1) ВРБ на основі магніточутливих матеріалів.

Важливою особливістю ВРБ є формування періодичних розподільчих ґраток з просторовим фазовим керуванням всередині серцевини волокна.

В останні кілька десятиліть ВРБ використовували для виявлення магнітного поля в комбінації з магнітострикційними матеріалами або магнітного поля. Цей датчик повинен був вимірювати поздовжню деформацію волокна, яка була індукована деформацією магнітострикційних матеріалів або магнітного поля.

З одного боку, для чутливих матеріалів дослідники виготовили мультишар TbDyFe і нанесли його на ВРБ методом магнетронного розпилення для зондування магнітного поля.

З того часу інші дослідники розробили оптичне волокно MFS з використанням стрижнів TbDyFe. Датчик з одномодовим волокном (СМФ) з інжектуючою порожнистою структурою бреггівського волокна мав чутливість до 86,43 пм/мТл в діапазоні 0-12 мТл.

З іншого боку, для методів демодуляції дослідники запропонували оптичне волокно ДМП з використанням опитування інтенсивності, роздільна здатність якого може досягати 0,023 мТл.

Магнітострикційні матеріали є перспективними кандидатами для збору енергії з джерел навколишнього середовища та автономних датчиків для виявлення вірусу. Високе співвідношення поверхні до об'єму дозволяє наночастинкам мати кращу поверхневу взаємодію між сенсором і біомолекулою, що аналізується.

Це робить сенсор на основі наноматеріалів кращим кандидатом для швидкого та надійного виявлення вірусних частинок. Передбачається, що магнітострикційні матеріали, інкрустовані наночастинками для виявлення вірусів, стануть орієнтиром для дослідників матеріалів у їхній подальшій роботі над розробкою розумних біосенсорів, які можуть ще більше підвищити чутливість виявлення.

Існує потреба в розробці ефективних і надійних магнітострикційних сенсорів з наночастинками для виявлення вірусів.



## 2) ІФП.

Порожнина Фабрі-Перо – це оптичний інтерференційний простір, що складається з паралельних зазорів між торцевою поверхнею волокна і чутливими матеріалами. Порожнини Фабрі-Перо класифікуються на внутрішні і зовнішні.

Внутрішня порожнина складається з декількох ділянок оптичного волокна, на які нанесена плівка з високим коефіцієнтом відбиття. Порядок довжини порожнини Фабрі-Перо, як правило, знаходиться в мікрометровому масштабі, що важко контролювати, а пов'язані з цим аспекти рідко вивчаються і не мають широкого застосування.

Оптоволоконний ДМП базується на зовнішній порожнині Фабрі-Перо, що складається з магніточутливих матеріалів і торцевої поверхні волокна. З одного боку, для методів демодуляції магнітострикційні матеріали використовуються для виготовлення чутливого компонента, довжина якого змінюється з прикладеним постійним магнітним полем, що призводить до зміни довжини інтерферометричної порожнини. Довжина каверни була отримана шляхом дослідження спектру інтерференції білого світла і відстеження довжини хвилі резонансного піку.

З іншої точки зору, для чутливих матеріалів Metglas використовується як різновид магнітострикційних матеріалів для оптичних волоконних ДМП. Під дією зовнішнього магнітного поля довжина порожнини Фабрі-Перо змінюється з магнітним об'ємом, пов'язаним з тепловим рухом наночастинок.

Така ситуація призводить до зсуву різниці оптичних діапазонів. Дослідники частково інжектували магнітне поле у порожнину Фабрі-Перо, що складається з двох секцій і капілярної скляної трубки. Довжина порожнини змінюється під дією зовнішнього магнітного поля, що призводить до спектрального зсуву.

В даний час інтенсивна і фазова демодуляція є двома основними методами демодуляції, заснованими на принципі ІФП. У той час як точність демодуляції інтенсивності обмежена точністю тестування інтенсивності світла і стабільністю оптичної системи, підхід фазової демодуляції широко використовується завдяки простій конфігурації і стабільній структурі.

Шляхом відпалу сплаву Metglas п'єземагнітний коефіцієнт матеріалу збільшився, оскільки резонансні втрати зменшилися, і була досягнута надвисока чутливість 0,5 пТл.

### 3) Структура ІМЦ з магнітною рідиною.

ІМЦ – це діелектричний інтерферометр, запропонований у 1891 році німецьким фізиком Зенделем. Його можна використовувати для спостереження відносного фазового зсуву двох колімованих променів, розділених від променя, випромінюваного одним джерелом світла, після проходження через різні діелектрики і шляхи.

Оскільки режим структури наночастинок у магнітному полі змінюється зі зміною напруженості магнітного поля, вимірювання напруженості магнітного поля може бути реалізовано шляхом моніторингу зсуву довжини хвилі або зміни інтенсивності ІМЦ з покриттям. Чутливість довжини хвилі та інтенсивності становила -24 пм/Ое та 0,085 дБ/Ое відповідно.

Різна точність вимірювання може бути отримана при використанні різних чутливих структур. Структура, що складається з бічних полірованих порожнистих волокон і двох секцій, утворює ІМЦ, де зміни в наночастинках на бічних полірованих дефектах викликають зміни в спектрі пропускання.

Чутливість до напруженості та напрямку магнітного поля може досягати 240 пм/мТл і 180 пм/° відповідно. Перевагою ІМЦ є те, що він не має відбивача на кінці волокна, що дозволяє подолати недолік ехо-інтерференції і, отже, широко використовується в області технології зондування оптичних волокон.

### 4) ППР діелектричної рідини.

ППР – це явище, яке полягає в тому, що при відбитті світла від металевої поверхні утворюється як затухаюча хвиля, так і плазмова хвиля, причому резонанс виникає при зустрічі двох хвиль, після чого інтенсивність світла значно зменшується.

Інтенсивність відбитого світла залежить від показника заломлення поверхні металу. На сьогоднішній день ППР є підходом для точного вимірювання показника заломлення.

Запропоновано сучасний плазмонний волоконно-оптичний датчик на основі інтеграції ППР і ДМП, який повністю використовує властивості плазмонних рефрактометрів, такі як низькі втрати (менше 0,2 дБ).

Крім того, розробка наночастинок, таких як Metglas і магнітострикційних феритових матеріалів, підвищує чутливість сенсорів, що застосовуються для збору енергії та зберігання інформації з високою щільністю.

### 3.3.3. Реалізація покращення різних вимірювань магнітного поля

Відповідно до чутливості та діапазону вимірювання, підходи до вимірювання оптичного магнітного поля можна розділити на виявлення слабкого біологічного магнітного поля, геомагнетизму, хімічних речовин, інтелектуальної інформації, стану пристрою в новій енергетичній системі, а також зоряного магнітного поля.

На рисунку 3.4 показано області застосування і корельовані методи підходів до вимірювання оптичного магнітного поля при різних напруженостях зовнішнього магнітного поля.

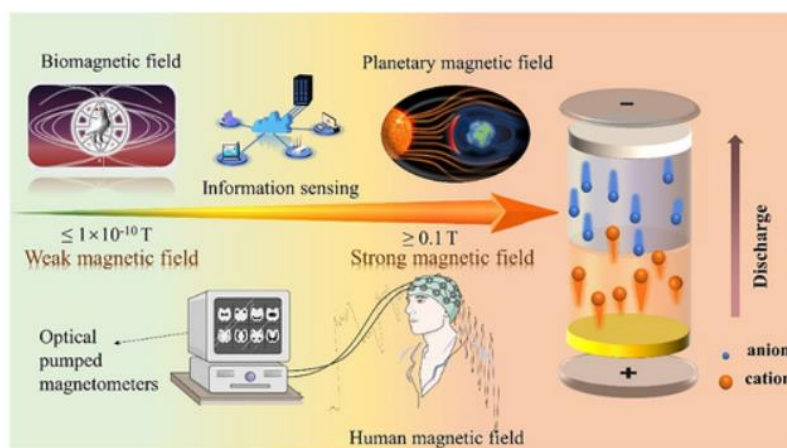


Рисунок 3.4 – Области застосування та кореляційні методи оптичних вимірювань при різній напруженості зовнішнього магнітного поля

Ефективне виявлення магнітного поля знаходиться в центрі уваги багатьох галузей техніки і досліджень. Діапазон вимірювання запропонованого

сенсора, що складається зі структури підвищення чутливості, магнітострикційних наночастинок та матриці з епоксидної смоли, дещо нижчий, ніж у сенсора на основі магнітометра з оптичним накачуванням, запропонованого Кочуховим у 2020 році.

А для вимірювання високочастотного магнітного поля Баль використав один штучний атом для реалізації надчутливого магнітометра. Чутливість цього детектора в діапазоні 100 кГц-10 МГц порівнянна з надпровідними квантовими інтерференційними пристроями (SQUID) та атомними магнітометрами еквівалентної просторової роздільної здатності.

Отже, ці результати свідчать про те, що результати вимірювань, отримані за допомогою магнітометра з оптичною накачкою, можуть досягти ширшого діапазону вимірювань і надавати більш чутливу інформацію для виявлення магнітного поля, ніж традиційні оптичні підходи.

І ці перспективні методи можуть прокласти шлях для подальшого розвитку оптичних методів, що використовуються для виявлення магнітного поля. В останні роки багато дослідників мають власний досвід у методах зондування і виявлення магнітних полів. Як показано на рисунку 3.5, вищезгадані оптичні методи вимірювання порівнюються за п'ятьма основними параметрами, включаючи чутливість, діапазон вимірювання, роздільну здатність, розмір, а також вартість.

Очевидно, що поєднання плазмового волоконного наконечника і ДМП не є єдиним ефективним підходом для підвищення чутливості вимірювань. Було запропоновано застосувати цифрову кореляційну технологію для зондування магнітного поля шляхом вимірювання зсуву спекл-картини з чутливістю 0,00705 мТл-1 і діапазоном вимірювання 50-100 мТл.

Зменшення об'єму зондування ДМП має першорядне значення для розширення сфер застосування. При цьому чутливість, роздільна здатність і діапазон вимірювань, очевидно, покращилися.

У порівнянні з комбінацією плазмового волоконного наконечника і крайової фільтрації, запропоновані датчики на основі магнітострикційного

стрижня, прикріпленого до ВРБ з високим ослабленням, можуть досягти чутливості до 3,95 пм/мТл, а діапазон вимірювання досягає 6 мТл.

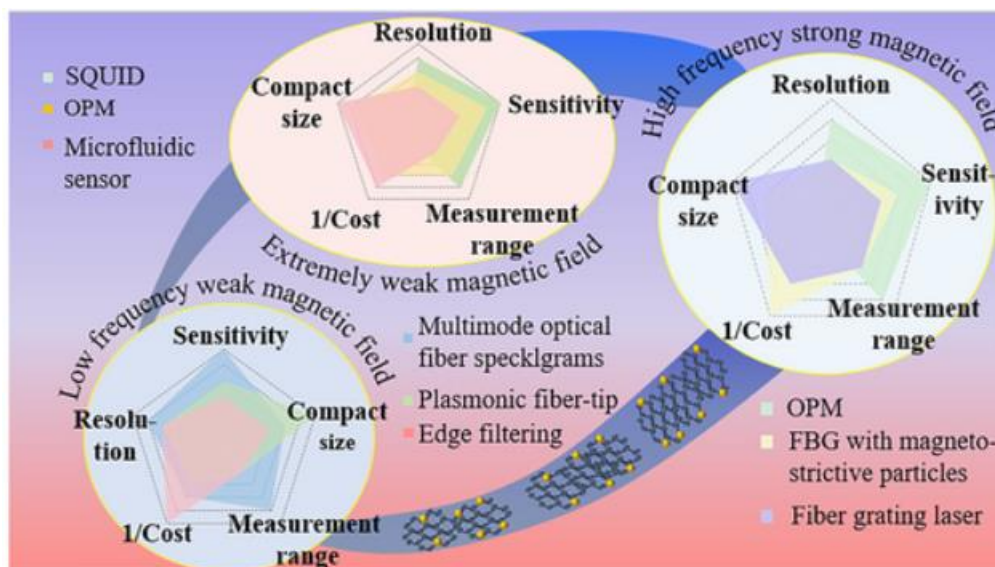


Рисунок 3.5 – Порівняння оптичних методів вимірювання за п'ятьма основними параметрами

Несприйнятливість до електромагнітних перешкод є життєво важливою характеристикою технології оптичного зондування для задоволення різноманітних вимог застосування. Найважливіше те, що оптичні вимірювальні технології з межею виявлення до 100 фТл досягають значних успіхів у виявленні слабких магнітних полів.

Магнітні екрануючі матеріали, такі як магнітні наночастинки заліза та N-крапкова аморфна вуглецева наносфера (~200 нм), можуть екранувати вплив зовнішнього магнітного поля, що може бути використано в оптоволоконних ДМП для підвищення точності вимірювання.

Волоконно-оптичні біомагнітні сенсори є життєво важливими промоутерами, оскільки очікується, що вони зможуть досягати надзвичайно слабкого магнітного поля на пікометровому рівні.

Порівняно з SQUID, магнітометр з оптичною накачкою (OPM), як правило, поступається. На щастя, для OPM не обов'язково працювати в умовах низьких температур, що дозволяє йому широко використовуватися. Це, разом з

чутливістю до 1 фТл, робить OPM ідеальним пристроєм для виявлення надзвичайно слабких магнітних полів. Як видно з рисунка 3.5, на відміну від SQUID, датчик з вбудованим мікрофлюїдом має менший розмір, але гіршу роздільну здатність і чутливість.

Таким чином, взаємне обмеження між чутливістю та розміром є суттєвим фактором, що впливає на вдосконалення сенсорів. Можна зробити висновок, що магнітоелектричні датчики на затворі потоку домінують у вимірюванні магнітного поля в широкому діапазоні. Крім того, завдяки значному двоприменезаломленню, яке змінюється при скручуванні волокна, частота поляризаційної моди є вразливою до зовнішнього магнітного поля.

Схема зондування на основі волоконного кільцевого лазера є конфігурацією з ширшим діапазоном вимірювання, що дає значення до 437 Ое. На додаток до оптичного волокна, було запропоновано магнітне зондування з використанням потенціалу дії як методу виявлення магнітного поля, що може забезпечити вражаючу чутливість 1 нТл.

#### 3.3.4. Вимірювання біомагнітного поля на основі нанорозмірних SQUID

Виявляючи зміни в біомагнітних сигналах людського тіла, можна аналізувати стан серця, мозку або м'язів. Тим не менш, технологія надчутливого зондування біомагнітних сигналів людини є надзвичайно складною через надзвичайно слабку напруженість і частоту магнітного поля, що генерується людськими органами.

Кардіомагнітні поля людини та енцефаломагнітні поля, що генеруються природним біологічним струмом, становлять 10-12 Тл, тоді як залишкове магнітне поле, спричинене сильними магнітними речовинами, що потрапляють в організм, становить 10-8 Тл. Пікові амплітуди близько 25 пТл були виявлені в серцях дорослих за допомогою магнітокардіографа (МКГ).

Отже, датчики можуть вимірювати відповідні біомагнітні сигнали, такі як магнітоенцефалографія (MEG), магнітонейрографія (MNG), магнітоміографія (MMG) і MCG, як показано на рисунку 3.6.

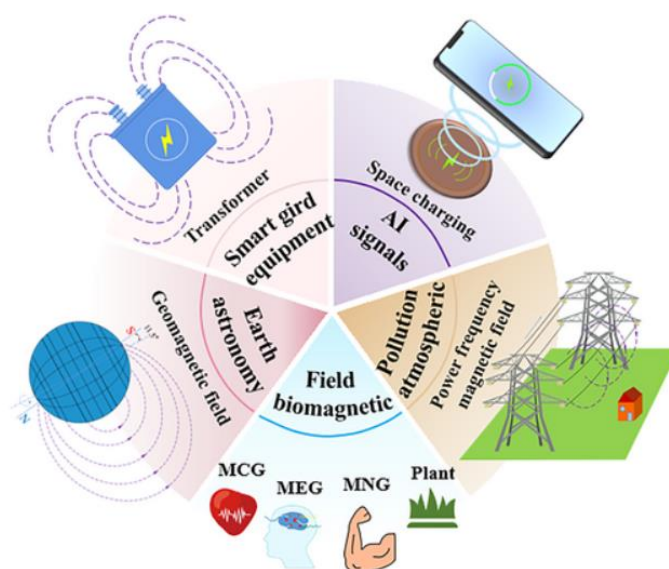


Рисунок 3.6 – Застосування волоконно-оптичної технології зондування магнітного поля

Варто згадати широкий спектр методів вимірювання біомагнітних полів. Нещодавні розробки в галузі покращення продуктивності OPM посилили конкурентоспроможність систем OPM з SQUID в роздільній здатності магнітних полів. За останні десятиліття OPM з компактними розмірами вражаюче покращила межу виявлення нижче 100 фТл.

Однак налаштування однопроменевої системи OPM для роботи на високих частотах все ще залишається складним завданням.

### 3.3.5. Технологія магнітних датчиків в інтелектуальних мережах

Широко розповсюджені портативні електронні пристрої значно полегшують роботу та повсякденне життя, проте проблема поповнення енергії в акумуляторі живлення залишається актуальною. Так, з популяризацією мобільних пристроїв, бездротового зв'язку та мережових технологій в останні роки значну увагу привертає технологія бездротової передачі енергії (WPT).

Енергія змінного в часі магнітного поля, що генерується кожним струмопровідним провідником в системі WPT, може бути зібрана для автономної бездротової системи моніторингу для житла та промисловості.



Водночас, порівняно з традиційними методами передачі даних через кабелі, використання магнітних сигналів для релейної передачі може ефективно усунути шуми та спотворення сигналу, спричинені довгими кабелями.

Однак, як середовище передачі даних для WPT, магнітне поле неминуче піддається впливу навколишнього середовища, створюючи потенційну загрозу безпеці людини. На сьогоднішній день запропоновано дослідження екрануючих матеріалів в резонансній частоті кГц.

Крім того, динамічний моніторинг магнітного поля витoku в системі WPT також є важливим напрямком розвитку в майбутньому. Таким чином, оптичні МФС на основі нанодіелектриків, із завадостійкістю та високою роздільною здатністю, також мають великий потенціал для розвитку WPT.

На сьогоднішній день магнітометрія SQUIDs є стандартом для проведення біомагнітних вимірювань. Завдяки оптимізації шумів і дизайну структури мікроелектромеханічних систем (MEMS) SQUID можна реалізувати складні вимірювання, такі як MCG і MEG.

Мініатюризація нанорозмірних SQUID в системі на основі нанодротів на основі оксиду міді ітрію та барію була реалізована за допомогою процесів нановиробництва. Висококритичні надпровідники на основі нанодротів з чутливістю  $100 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$  можуть стати інструментом для MEG та магнітно-резонансної томографії в низьких полях.

Крім того, діагностика електромагнітних характеристик рослин з діапазоном  $0,5 \text{ пТл}$  також є перспективною в сільськогосподарському застосуванні.

Зважаючи на недоліки вищезгаданих методів, в останні роки для моніторингу біомагнітного поля поступово почали застосовувати волоконно-оптичні ДМП на основі нанодіелектриків.

Цей датчик може легко і точно виявляти магнітне поле, що генерується організмами, в той час як вимоги до об'єму і портативності є жорсткими. Оптиковолоконний МФС має певні переваги в цих аспектах.

### 3.3.6 Майбутній розвиток та перспективи в рамках використання нанодіелектриків у датчиках магнітного поля

Останнім часом інтенсивно досліджуються оптичні сенсори, що застосовуються для виявлення магнітного поля. Магнітострикційні матеріали, такі як Metglas і FeSiB, є одними з найпривабливіших чутливих матеріалів і використовуються в різних сферах застосування сенсорів, які надають ефективну інформацію для покращення відгуку чутливого компонента в ДМП.

Датчики на основі різних магніточутливих матеріалів і конфігурацій були узагальнені і розглянуті. Останні досягнення вказують на те, що одночасне підвищення чутливості та зменшення розмірів є складним завданням. Таким чином, подальший розвиток ДМП вимагає широких міждисциплінарних зусиль у різних галузях.

Наприклад, більше зусиль слід присвятити розробці магнітострикційних матеріалів, які мають одночасно хорошу магнітострикцію і біосумісність.

Перспективним є дослідження надвисоких значень константи Верде у 2D функціональних мінералах та магнітних наночастинках з полімерним покриттям.

Тим часом, екрануючі матеріали, такі як MXene, широко використовуються як наповнювачі для підвищення екрануючої здатності нанокомпозитів до електромагнітних завад.

Наномагнітострикційні матеріали пропонують рішення для посилення мікрODEформації на пікометровому рівні чутливих компонентів в МФС, що може бути застосовано в більш наукових і промислових застосуваннях біомедицини, космічних досліджень та енергетичного Інтернету на основі IoT[15].

### 3.4. Покращення роботи датчиків магнітного поля за допомогою метаматеріалів

Використання концепції Інтернету речей (IoT) в промисловості, транспорті та повсякденному житті призвело до стрімкого росту досліджень

нових конструкцій різноманітних датчиків, які забезпечують інтелектуальний контроль та системи управління числовою інформацією.

Магнітні сенсори є ключовими елементами в концепції Інтернету речей (IoT). Їхній рівень чутливості стає вирішальним для багатьох застосувань у різних галузях.

У сучасній інформаційній епосі сенсори є ключовими елементами, які забезпечують моніторингову інформацію, необхідну для нашого взаємопов'язаного суспільства. Магнітні сенсори є одними з найважливіших компонентів цих технологій. Комп'ютери мають великі обсяги пам'яті, які зчитуються магнітними сенсорами.

Літаки, автомобілі – зокрема, автономні – та інші транспортні засоби регулярно безпечно рухаються завдяки введеним складним масивам магнітних сенсорів. Фабрики і навіть цілі міста (особливо в межах концепції розумних міст) великою мірою покладаються на магнітні сенсори для підвищення ефективності та сталості. Магнітні сенсори відіграють ключову роль у космічних досліджах.

Як було розглянуто у попередніх розділах, існують різні види магнітних сенсорів, заснованих на кількох фізичних принципах. До них входять ефект Холла, флюксгейт, та магнітозалежні ефекти типів AMR і GMR.

#### 3.4.1. Загальна стратегія для підвищення чутливості магнітних сенсорів

Стратегія підвищення чутливості сенсорів полягає в використанні магнітних матеріалів для концентрації магнітних полів навколо сенсора, зазвичай, просто розміщуючи його в проміжку між двома кусками магнітного матеріалу з високою проникливістю. Це було використано, наприклад, у сенсорах ефекту Холла та магнітозалежних сенсорах.

Особливо важливий розділ застосувань магнітних сенсорів пов'язаний з виявленням крихітних магнітних полів. Великий прогрес у чутливості сенсорів дозволяє їх використання в вимогливих біомагнітних застосуваннях.

У цих застосуваннях зазвичай вимірюється не лише магнітне поле, але і його просторовий градієнт для допомоги у вилученні шуму від небажаних джерел поля.

Зростаючий попит на вищу чутливість магнітних сенсорів потребує нових ідей чи рішень. У цій магістерській роботі пропонується новий спосіб підвищення їхньої чутливості за допомогою спеціальних властивостей формування магнітних полів, які забезпечуються магнітними метаматеріалами.

Метаматеріали, властивості яких залежать від їхньої внутрішньої структури, а не від хімічного складу, представляють собою революцію в способах контролю електромагнітних полів. Магнітні метаматеріали є особливо корисним типом. Вони дозволили створити нові пристрої для управління магнітними полями, такі як магнітні плащі чи магнітні труби для передачі полів на великі відстані.

#### 3.4.2. Використання метаматеріалів для підвищення концентрації електромагнітних полів

Одна з властивостей, яку можна підвищити за допомогою використання метаматеріалів, - це концентрація електромагнітних полів. Проте для електромагнітних хвиль концентрація в обсязі, оточеному метаматеріалами, не є практичною: використовуючи оптику перетворення, можна побачити, що для пристрою потрібен матеріал у отворі, що перешкоджає розміщенню сенсора. Метаматеріали також використовуються для концентрації теплової енергії та акустичних хвиль.

У випадку магнітного поля значна концентрація магнітних полів може бути досягнута в порожнині, оточеній довгим порожнистим циліндром, розташованим перпендикулярно до поля. Проте реальне застосування для підвищення чутливості магнітних сенсорів вимагає просторової концентрації в тривимірному просторі, замість більш ідеалізованої дослідженої двовимірної геометрії довгого циліндричного оболонки, щоб повністю використовувати проникнення поля у всіх напрямках.

3D сферична метаматеріальна оболонка, оточуючи магнітний сенсор, може концентрувати як магнітне поле, так і градієнт в його навколишньому середовищі, значно підвищуючи його чутливість. 3D геометрія (сферична оболонка) фундаментально відрізняється від 2D випадку, що призводить до важливих переваг.

Для вивчення магнітної концентрації властивостей сферичної оболонки в зовнішньому полі мною було отримано аналітичні рішення магнітостатичних рівнянь Максвелла. Розглянемо сферичну оболонку з внутрішнім радіусом  $R_1$  і зовнішнім радіусом  $R_2$ , виготовлену з лінійного, однорідного та анізотропного магнітного матеріалу. Однорідне магнітне поле  $H_0$  застосовується у напрямку  $z$ .

Оболонка характеризується своїми відносними проникливостями в радіальному, азимутальному та полярному напрямках,  $\mu_r$ ,  $\mu_\phi$  та  $\mu_\theta$  відповідно, таким чином, що:

$$B_r = \mu_0 \mu_r H_r, \quad (29)$$

$$B_\phi = \mu_0 \mu_\phi H_\phi, \quad (30)$$

$$B_\theta = \mu_0 \mu_\theta H_\theta, \quad (31)$$

де  $B_{r,\phi,\theta}$  and  $H_{r,\phi,\theta}$  - це радіальні, азимутальні та полярні компоненти магнітної індукції  $B$  та магнітного поля  $H$  відповідно,  $\mu_0$  - проникливість вакууму. Ми обираємо  $\mu_\phi = \mu_\theta$  для простоти.

Рішення показують дві важливі властивості. По-перше, поле всередині сферичної порожнини - це однорідне поле в напрямку застосованого магнітного поля:

$$H^{INT} = H_0 \frac{6\mu_r a \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{(3+a)/2}}{F + G \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^a} \hat{z} \quad (32)$$

де  $F = -4 - \mu_r - 4\mu_r \mu_\theta + 3\mu_r a$ ,  $G = 4 + \mu_r + 4\mu_r \mu_\theta + 3\mu_r a$ , і  $a^2 = 1 + 8\mu_r / \mu_\theta$ .

По-друге, поле, створене оболонкою в зовнішній області, - це поле диполя, розташованого в центрі оболонки, і направлене в напрямку застосованого магнітного поля з магнітним моментом:

$$m^{EXT} = 4\pi H_0 R_2^3 \frac{2(-1-\mu_r-2\mu_r\mu_\theta)\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^a - 1}{F+G\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^a} \hat{z} \quad (33)$$

Для 2D випадку нескінченно довгого порожнього циліндра в поперечному прикладеному магнітному полі  $H_0$  було показано, що максимальна концентрація поля в отворі циліндра досягається, коли оболонка має радіальні та кутові проникливості  $\mu_\rho \rightarrow \infty$  та  $\mu_\phi \rightarrow 0$  відповідно. У цьому випадку зовнішнє поле не спотворюється, і воно стає магнітно невиявним.

Можемо дослідити у випадку 3D сферичної оболонки концентрацію поля, яка відповідає рішенню без спотворення. Магнітний дипольний момент  $m^{EXT}$  в рівнянні (33) контролює спотворення поля за межами оболонки. Залежно від його знаку лінії магнітного поля будуть притягуватися до оболонки ( $m^{EXT} > 0$ ) або відштовхуватися від неї ( $m^{EXT} < 0$ ). Рішення рівняння (33) для  $m^{EXT} = 0$  - це випадки відсутності спотворення однорідного прикладеного магнітного поля, які виникають, коли:

$$\mu_\theta = \frac{1-\mu_r}{2\mu_r} \quad (34)$$

З урахуванням співвідношення проникливості (34) та (32) отримуємо, що магнітне поле всередині отвору для рішень без спотворення є:

$$H^{INT} = H_0 \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{1-\mu_r/2} \quad (35)$$

що нагадує аналогічне співвідношення для циліндричної оболонки з проникливостями  $\mu_\rho$  та  $\mu_\phi$  та внутрішніми та зовнішніми радіусами  $R_2$  та  $R_1$  відповідно, в перпендикулярно прикладеному магнітному полі  $H_0$ . У рівнянні (35) чим більше значення  $\mu_r$ , тим вище значення концентрованого поля всередині оболонки. В межах  $\mu_r \rightarrow 0$  ( $\mu_\theta \rightarrow \infty$ ) поле в отворі дорівнює нулю (рис. 10а), тобто

це випадок закривання, тоді як в області обертання  $\mu_r \rightarrow \infty$  ( $= 1/2$ ) отримується (рис. 3.7, b).

Магнітні лінії індукції  $B$  та енергетична щільність ( $1/2 H \cdot B$ ; кольорове відображення) при застосуванні однорідного зовнішнього магнітного поля в наявності оболонки зі співвідношенням радіусів  $R_2/R_1 = 2$  та магнітною проникливістю (a)  $\mu_r = 10^4$  та  $\mu_\theta = 10^4$ , (b)  $\mu_r = 10^4$  та  $\mu_\theta = 1/2$ , та (c)  $\mu_r = 10^4$  та  $\mu_\theta = 10^{-4}$ .

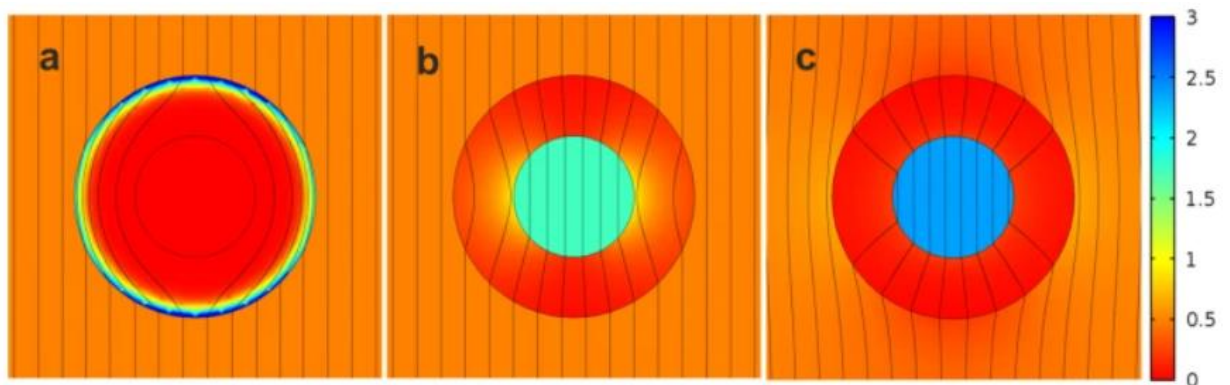


Рисунок 3.7 – Порівняння сферичних оболонок

Максимальною концентрацією поля в отворі або, навпаки, чи існують інші рішення, які надають ще більшу концентрацію. Аналізуючи рівняння (32) за фіксованого значення  $\mu_\theta$ , максимальне поле всередині отвору досягається, коли  $\mu_r \rightarrow \infty$ , і коли фіксується значення  $\mu_r$ , максимальне поле всередині отвору досягається, коли  $\mu_\theta \rightarrow 0$ . Отже, абсолютне максимальне значення знаходиться в граничному випадку  $\mu_r \rightarrow \infty$  і  $\mu_\theta \rightarrow 0$  і становить:

$$H^{INT} (\mu_r \rightarrow \infty, \mu_\theta \rightarrow 0) = H_0 \frac{3 \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}{1 + 2 \left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (36)$$

що підсилює прикладене поле множником, який зростає із співвідношенням  $R_2/R_1$ . Зокрема, це підсилення може бути ідеально надто великим, зменшуючи  $R_1$  до довільно малих значень. Концентрація в цьому випадку більша, ніж та, яку можна отримати з недеформованої сферичної

оболонки для всіх можливих відношень  $R_2/R_1$ . Це фундаментально відрізняється від циліндричного випадку, в якому недеформована оболонка забезпечує максимальну концентрацію в отворі.

Відмінності між оболонками з  $(\mu_r, \mu_\theta) = (\infty, 1/2)$  та  $(\mu_r, \mu_\theta) = (\infty, 0)$  можна побачити на рисунку 3.7: b і c. Цікаво, що в разі максимальної концентрації сфера витісняє деякі магнітні лінії поля, тобто має діамагнітну поведінку.

Отже, можна зробити висновок, що 3D сферична оболонка з  $(\mu_r, \mu_\theta) = (\infty, 0)$  може забезпечити велику концентрацію прикладеного магнітного поля в її отворі, і що оболонка максимальної концентрації поля це та, яку, підходячи, експериментально тестують.

Для кращого розуміння властивостей концентрації для різних 3D сферичних оболонок проаналізуємо ці випадки з точки зору їхньої магнітної енергії. Для оболонки максимальної концентрації  $(\mu_r, \mu_\theta) = (\infty, 0)$  магнітна індукція має радіальний напрямок, а магнітне поле  $H^{SHE}$  має кутовий напрямок всередині об'єму оболонки. Таким чином, щільність енергії в оболонці  $(1/2)B^{SHE}H^{SHE}=0$ , як це відбувається для циліндричної оболонки з максимальною концентрацією поля. Використовуючи рівняння (36), отримуємо, що загальна енергія всередині отвору оболонки в разі максимальної концентрації є:

$$E_{max}^{INT} = 6\mu_0\pi H_0^2 R_2^4 R_1 / (R_1 + 2R_2)^2 \quad (37)$$

Ця енергія менша за енергію, яка б була в об'ємі між  $r = 0$  та  $r = R_2$  без наявності оболонки, для всіх відношень радіусів. Оскільки загальна енергія всередині оболонки дорівнює нулю, наявність енергії всередині отвору, меншої за  $E^{INT} = (\frac{2}{3})\mu_0\pi H_0^2 R_2^4 R_1$ , можливо лише тоді, коли частина енергії виштовхується на зовнішню сторону. Таким чином, в разі максимальної концентрації частина енергії, яка б була в області, якщо б не було оболонки, переміщується в отвір оболонки, а решта розташована у зовнішній області  $B^{SHE}H^{SHE} \neq 0$ , що призводить до спостереженого відхилення зовнішнього магнітного поля (рис. 1.1, c).



Вище представлено теорію та концепцію щодо загального методу підвищення чутливості магнітного датчика, оточуючи його сферичною оболонкою, яка концентрує магнітне поле навколо датчика. Практична реалізація — це лише одна із багатьох можливих реалізацій.

Після відповідної оптимізації масштабу метаматеріалу може бути зменшено, і коефіцієнт концентрації може бути значно збільшений, наприклад, шляхом зменшення внутрішнього радіусу оболонки (34), що є впровадженням дуже малих розмірів багатьох сучасних магнітних датчиків.

Багато з найважливіших застосувань магнітних датчиків передбачають виявлення дуже слабких магнітних полів у сферах, таких як біомедицина, пошуково-розвідувальні роботи, космічні дослідження чи геомагнетизм[16].

## ВИСНОВКИ

Таким чином, було представлено ретельне дослідження поточного стану та потенційного розвитку датчиків магнітного поля, що підкреслює їх критично важливу роль в еволюції IoT та смарт-технологій. Дослідження спрямоване на розробку більш точних, енергоефективних і адаптивних датчиків магнітного поля, що відповідають зростаючим вимогам сучасних і майбутніх пристроїв IoT.

У першому розділі роботи детально досліджено магнітні поля, їх властивості та поведінку. Він також включає аналіз різних датчиків магнітного поля, з акцентом на датчики на основі ефекту Холла. У розділі розглядаються проблеми та обмеження, з якими стикаються ці датчики, особливо в додатках Інтернету речей (IoT). Підкреслюється необхідність підвищення точності, чутливості, енергоефективності та мініатюризації, а також пропонуються інноваційні підходи до покращення характеристик датчиків магнітного поля. Дослідження має на меті зробити внесок у розробку більш точних та ефективних датчиків магнітного поля для сучасних пристроїв Інтернету речей.

У другому розділі роботи аналізується мережа Інтернету речей (IoT). Він включає вивчення технологій, що використовуються в IoT, з акцентом на різні типи мереж IoT та аналіз мережевих протоколів IoT. Розділ також заглиблюється у вивчення пристроїв Інтернету речей, їх архітектури та компонентів, включаючи датчики, контролери, шлюзи та центри обробки даних. Крім того, в ньому досліджується застосування Інтернету речей в промисловості на прикладі "розумних" заводів, обговорюється підключення та оптимізація цих заводів, а також їхні функції самообслуговування і проблеми у виробничій сфері.

У третьому розділі роботи досліджуються методології вдосконалення датчиків магнітного поля в системах Інтернету речей (IoT). Основна увага приділяється виявленню та усуненню вразливостей датчиків, підвищенню продуктивності за рахунок використання нанодіелектриків, а також дослідженню застосування метаматеріалів. У розділі підкреслюється важливість високої точності та енергоефективності в роботі сенсорів у середовищі IoT. В

кінці розділу висвітлено потенціал для подальшого розвитку і застосування цих передових сенсорних технологій в системах IoT.

Результати роботи можуть бути застосовані в різних секторах Інтернету речей, зокрема, в удосконаленні сенсорних технологій в розумних пристроях, промислових додатках Інтернету речей, таких як "розумні" фабрики, і системах моніторингу в охороні здоров'я. Магістерська робота успішно досягає поставлених цілей і завдань, демонструючи досягнення в технології датчиків магнітного поля та їх інтеграції в мережі IoT, тим самим вносячи значний внесок у розвиток більш ефективних і точних систем IoT.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The Behavior of the Open Magnetic Field of the Sun [Електронний ресурс]. – 2001. – Режим доступу до ресурсу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/322503/meta>
2. Djamal Mitra Development of sensors based on giant magnetoresistance material /Mitra Djamal, Ramli// Proc. Eng. – 2012. – Vol. 32. – P. 60 – 68.
3. Methods for the Construction of Protection with Magnetosensitive Elements for the Parallel Circuits with Single end Supply [Електронний ресурс] // IEEE – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9111997>.
4. Коновал О. А. Основи електродинаміки. Кривий Ріг : Видавничий дім, 2008
5. Magnetic Field Sensors' Calibration: Algorithms' Overview and Comparison [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5288>
6. An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges [Електронний ресурс] // IEEE. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8372905>
7. Chien C. The Hall Effect and Its Applications / Chris Chien..
8. Hall Sensors for Extreme Temperatures [Електронний ресурс]. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/11/1/876>
9. Ramsden E. Hall-Effect Sensors: Theory and Application / Edward Ramsden.
10. A Semantic Analysis for Internet of Things [Електронний ресурс] // IEEE – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5523336>
11. Comparative Analysis of Wireless Communication Technologies for IoT Applications [Електронний ресурс] // Springer. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-6448-9\\_39](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-6448-9_39)

12. A Trend Analysis Method for IoT Technologies Using Patent Dataset with Goal and Approach Concepts [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-016-3276-y>
13. Analysis of factors affecting IoT-based smart hospital design [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: [journalofcloudcomputing.springeropen.com/articles/10.1186/s13677-020-00215-5](http://journalofcloudcomputing.springeropen.com/articles/10.1186/s13677-020-00215-5)
14. A Survey on Sensor-Based Threats and Attacks to Smart Devices and Applications [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9372295>
15. The future of magnetic sensors [Электронный ресурс] // Swiss Federal Institute of Technology – Режим доступа до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092442479601285X>
16. Improved Sensitivity and Noise in Magneto-Electric Magnetic Field Sensors by Use of Modulated AC Magnetostriction [Электронный ресурс] // IEEE. – 2021. – Режим доступа до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9372295>