

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інформаційних електронних систем

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

ПАРАМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Виконав: студент 4-го курсу, групи ТКР-216
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка
ОП- Радіотехніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Лобур О.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., каф. ІРТС

Осадчук Я.О.

(прізвище та ініціали)

« 10 » 06 2025 р.

Рецензент: д.т.н., доц., професор каф. ІКСТ

Михалевський Д.В.

(прізвище та ініціали)

« 11 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 12 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Інформаційних електронних систем
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

Олександр ОСАДЧУК

20.03. 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Лобуру Олександру Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Параметричні перетворювачі магнітного поля з частотним виходом для сенсорних мереж»

керівник роботи Осадчук Ярослав Олександрович, к.т.н., доц., каф. ІРТС

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20”03 2025 року № 97

2. Строк подання студентом роботи 11 06 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: провести аналіз сенсорів магнітного поля для бездротових IoT систем; дослідити концепції, пов'язані з бездротовими сенсорними мережами: архітектура, функції, компоненти та застосування; провести дослідження технології MFEN, яка є ефективним методом живлення сенсорів Інтернету речей для інтеграції в інтелектуальні мережі.

4. Зміст текстової частини: Вступ.. Аналіз сучасного стану сенсорів магнітного поля для сенсорних мереж. Розробка перетворювача потужності для збору енергії магнітного поля для створення автономних пристроїв SMART GRID IOT. Реалізація RFID-сенсор з інтегрованим збором енергії для бездротового вимірювання магнітних полів постійного струму. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Принципова діаграма, що ілюструє різні сигнали опору Холла з високочутливих та низькочутливих профілів. Залежність опору Холла від гістерезису магнітного поля чотирьох типів гетероструктур. Принципова схема з'єднань сенсора. Однокаскадний MOSFET-перетворювач Н-подібного мосту. Блок-схема схеми керування напругою шини постійного струму в MFEN. Результати моделювання. Схема сенсорної мітки на основі UHF RFID.) Блок-схема мітки сенсора магнітного поля на основі UHF RFID. Діаграма часової шкали роботи протягом часового вікна 60 мс.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	к.т.н., доцент каф. ІРТС Осадчук Я.О.		
Охорона праці	професор кафедри БЖДПБ, доцент, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 25.03.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	14.02.2025-28.02.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2025-19.03.2025	
3.	Розробка завдання на БКР. Затвердження теми.	20.03.2025-25.03.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	26.03.2025-06.05.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки . Експериментальне дослідження.	07.05.2025-18.05.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини БКР	19.05.2025-22.05.2025	
7.	Охорона праці (ОП)	23.05.2025-25.05.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	26.05.2025-05.06.2025	
9.	Нормоконтроль	07.06.2025-10.06.2025	
10.	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025-12.06.2025	
11.	Захист БДР ЕК	13.06.2025-17.06.2025	

Студент

(підпис)

Лобур О.О.

Керівник роботи

(підпис)

Осадчук Я.О.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Лобур О.О. Параметричні перетворювачі магнітного поля з частотним виходом для сенсорних мереж. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 102 с. На українській мові. Бібліогр.: 74 назв; Рис.41.

В бакалаврській кваліфікаційній роботі представлені найновіші дослідження, присвячені новим методам, матеріалам і пристроям магнітометрії, які можна впровадити в галузі IoT сенсорних мереж. Оскільки вони, як правило, високочутливі та легко об'єднуються в системи, ці методи мають багато перспектив у сприйнятті магнітних сигналів та в пристроях IoT сенсорних мереж.

У другому розділі представлені результати досліджень технології MFEN, яка є ефективним методом живлення сенсорів Інтернету речей для інтеграції в інтелектуальні мережі, що забезпечує альтернативу використанню звичайних батарей. Незважаючи на незначний вплив одного пристрою на додатковий імпеданс та гармоніки через перемикання перетворювача в лінії електропередач, необхідні подальші дослідження для оцінки впливу MFEN на масштабне розгортання цих технологій.

У третьому розділі розроблено та протестовано сенсор на основі UHF RFID для вимірювання густини магнітного потоку постійного струму. Сенсор на основі RFID містить вбудований пристрій збору енергії, який збирає енергію, необхідну для роботи RFID-мітки, з енергії, що випромінюється RFID-зчитувачем. Було розроблено дві окремі антени: одну для зв'язку між RFID-чіпом та RFID-зчитувачем, а іншу для збору енергії. Для керування передачею даних між сенсором Холла та RFID-чіпом використовувався мікроконтролер. Вся безбатарейна RFID-мітка була виготовлена на одній друкованій платі, що забезпечує компактний дизайн. Продуктивність сенсора оцінювалася при різних відстанях між сенсором та провідником на відстані 1 м від зчитувача до сенсора. Чутливість 7.5 $\mu\text{T/A}$ та 3.8 $\mu\text{T/A}$ вимірювалися для відстані між сенсором та провідником 0,5 см та 3 см відповідно. Сенсор має динамічний діапазон від 0 до 9 мТл, що відповідає постійному струму від 0 до 1200 А.

Ключові слова: перетворювач магнітного поля, сенсорна мережа, інтернет-комунікація, інтернет речей, моніторинг навколишнього середовища.

ABSTRACT

Lobur O.O. Parametric magnetic field converters with frequency output for sensor networks. Bachelor's qualification work. – Vinnytsia: VNTU, 2025. –102 p. In Ukrainian. Bibliography: 74 titles; Fig.41.

The bachelor's qualification work presents the latest research on new methods, materials and magnetometry devices that can be implemented in the field of IoT sensor networks. Since they are usually highly sensitive and easily integrated into systems, these methods have many prospects in the perception of magnetic signals and in IoT sensor network devices.

The second section presents the results of research on MFEH technology, which is an effective method of powering IoT sensors for integration into smart networks, providing an alternative to the use of conventional batteries. Despite the insignificant impact of a single device on additional impedance and harmonics due to switching of the converter in the power line, further research is needed to assess the impact of MFEH on the large-scale deployment of these technologies.

In the third section, a UHF RFID-based sensor for measuring the density of the DC magnetic flux is developed and tested. The RFID-based sensor contains a built-in energy harvesting device that harvests the energy required for the operation of the RFID tag from the energy emitted by the RFID reader. Two separate antennas were designed: one for communication between the RFID chip and the RFID reader, and the other for energy harvesting. A microcontroller was used to control the data transfer between the Hall sensor and the RFID chip. The entire battery-free RFID tag was fabricated on a single printed circuit board, which allows for a compact design. The sensor performance was evaluated at various sensor-to-conductor distances at a distance of 1 m from the reader to the sensor. Sensitivity of 7.5 $\mu\text{T/A}$ and 3.8 $\mu\text{T/A}$ were measured for sensor-to-conductor distances of 0.5 cm and 3 cm, respectively. The sensor has a dynamic range of 0 to 9 mT, corresponding to a DC current of 0 to 1200 A.

Keywords: magnetic field transducer, sensor network, Internet communication, Internet of Things, environmental monitoring.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	11
1.1 Багатофункціональні магніточутливі матеріали	11
1.2 Тонкоплівкові магніточутливі сенсори Холла	12
1.3 Магніточутливі композитні матеріали	17
1.4 Магніторезистивні сенсори	22
1.5 Магнітометри на ефекті Холла	26
1.6 Магнітопружні магнітометри	27
1.7 Магнітометри на основі спін-хвильової інтерферометрії	29
1.8 Висновки до розділу.....	32
2 РОЗРОБКА ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЗБОРУ ЕНЕРГІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ АВТОНОМНИХ ПРИСТРОЇВ SMART GRID IOT	33
2.1 Збір енергії магнітного поля (MFEN) з компонентів, що несуть струм	33
2.2 Принцип дії перетворювача потужності для збору енергії магнітного поля	37
2.3 Перетворювач потужності магнітного поля	39
2.4 Збір енергії магнітного поля.....	45
2.5 Моделювання магнітного поля перетворювача MFEN.....	46
2.6 Прототип MFEN.....	47
2.7 Висновки до розділу.....	55
3 РЕАЛІЗАЦІЯ RFID-СЕНСОР З ІНТЕГРОВАНИМ ЗБОРОМ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОГО ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	57
3.1 Сенсор на основі надвисокочастотної (UHF) радіочастотної ідентифікації (RFID) для моніторингу постійного струму лінії передачі	57
3.2 Проектування RFID-систем	61
3.3 Проектування та вимірювання антени	63
3.4 Вимірювання магнітного поля та передача даних	66
3.5 Експериментальна установка для тестування RFID-сенсора магнітного поля	71
3.6 Висновки до розділу.....	73
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	75
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	75

4.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	78
4.3	Пожежна безпека.....	82
	ВИСНОВКИ.....	84
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86
	Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	93
	Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (бакалаврської) кваліфікаційної роботи.....	101

ВСТУП

Актуальність. Сьогодні швидкий розвиток радіоелектроніки впливає на велику кількість науково-технічних розробок, що призводить до покращення якості повсякденного життя. Сучасні вимоги до інформаційно-вимірювальних та радіотехнічних систем передачі інформації, полягають у простих методах виготовлення, а також гнучкості використання і швидкому отриманні результатів тестування. Водночас, нові діагностичні платформи повинні бути точнішими та забезпечувати правильні клінічні рішення.

Загалом, застосування сенсорів магнітного поля в біомедицині обмежене високою вартістю виготовлення пристроїв і часто вимагає спеціального середовища для процедури. Крім того, важливим питанням є необхідна межа роздільної здатності цих сенсорів для виявлення відносно низьких магнітних сигналів від органів і тканин для сенсорних мереж. Тому більшість сучасних технологій для вимірювання малого магнітного поля вимагають магнітно екранованих приміщень або інших систем для активного екранування від сторонніх магнітних полів.

Технології збору енергії стають дедалі популярнішими як потенційні джерела енергії для пристроїв Інтернету речей (IoT). Збір енергії магнітного поля (MFEN) з компонентів, що несуть струм, таких як силові кабелі, є особливо перспективною технологією для застосувань інтелектуальних мереж, інфраструктури та моніторингу навколишнього середовища. У цій статті представлено однокаскадний перетворювач змінного/постійного струму, архітектуру керування та конструкцію збирача енергії, що застосовуються до пристроїв MFEN. Перетворювач потужності складається з повного мосту MOSFET, який використовується для активного випрямлення індукованої напруги на приймачі, забезпечуючи при цьому регульовану вихідну напругу. Цей підхід підходить для широкого спектру ліній електромережі, пропонуючи компактний силовий каскад, який забезпечує зменшення кількості компонентів, тоді як активне випрямлення мінімізує втрати енергії, тим самим покращуючи теплове управління в силовій електроніці порівняно з попередніми дослідженнями. Експериментальні результати показують, що перетворювач потужності забезпечує стабільне джерело енергії та пропонує альтернативу автономним пристроям інтелектуальних мереж IoT.

Метою роботи є покращення характеристик перетворювачі магнітного поля з частотним виходом для сенсорних мереж.

Об'єктом дослідження є концепції, пов'язані з бездротовими сенсорними мережами: архітектура, функції, компоненти та застосування.

Предметом дослідження – технології збору енергії для пристроїв Інтернету речей (IoT) та принципи реалізації ізотропного вимірювача надзвичайно низької частоти (ELF) на базі Інтернету речей, який може вимірювати щільність магнітного потоку в діапазоні від 100 нТл до 10 мкТл.

Для досягнення поставленої мети у бакалаврській кваліфікаційній роботі розв’язуються наступні задачі:

- провести аналіз сенсорів магнітного поля для бездротових IoT систем;
- дослідити концепції, пов'язані з бездротовими сенсорними мережами: архітектура, функції, компоненти та застосування;
- провести дослідження технології MFEN, яка є ефективним методом живлення сенсорів Інтернету речей для інтеграції в інтелектуальні мережі;
- розробити та протестувати сенсор магнітного поля на основі UHF RFID для вимірювання густини магнітного потоку постійного струму.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: основних залежностей теорії комплексних змінних; рівнянь та функцій математичної фізики; диференціального та інтегрального числення.

Наукова новизна одержаних результатів:

Представлені результати досліджень технології MFEN, яка є ефективним методом живлення сенсорів Інтернету речей для інтеграції в інтелектуальні мережі, що забезпечує альтернативу використанню звичайних батарей. Проведені дослідження впливу пристрою на додатковий імпеданс та гармоніки через перемикання перетворювача в лінії електропередач, необхідні подальші дослідження для оцінки впливу MFEN на масштабне розгортання цих технологій.

Проведені дослідження та реалізація сенсора на основі UHF RFID для вимірювання густини магнітного потоку постійного струму. Сенсор на основі RFID містить вбудований пристрій збору енергії, який збирає енергію, необхідну для роботи RFID-мітки, з енергії, що випромінюється RFID-зчитувачем. Було розроблено дві окремі антени: одну для зв'язку між RFID-чіпом та RFID-зчитувачем, а іншу для збору енергії. Для керування передачею даних між сенсором Холла та RFID-чіпом використовувався мікроконтролер.

Практичне значення одержаних результатів:

Розроблено та протестовано сенсор на основі UHF RFID для вимірювання густини магнітного потоку постійного струму. Сенсор на основі RFID містить вбудований пристрій збору енергії, який збирає енергію, необхідну для роботи RFID-мітки, з енергії, що випромінюється RFID-

зчитувачем. Було розроблено дві окремі антени: одну для зв'язку між RFID-чіпом та RFID-зчитувачем, а іншу для збору енергії. Для керування передачею даних між сенсором Холла та RFID-чіпом використовувався мікроконтролер. Вся безбатарейна RFID-мітка була виготовлена на одній друкованій платі, що забезпечує компактний дизайн. Виготовлений сенсор магнітного поля на основі RFID був протестований в установці, що нагадувала лінію передачі HVdc та пропускала максимальний постійний струм 1200 А. Продуктивність сенсора оцінювалася при різних відстанях між сенсором та провідником на відстані 1 м від зчитувача до сенсора. Чутливість 7.5 $\mu\text{T/A}$ та 3.8 $\mu\text{T/A}$ вимірювалися для відстані між сенсором та провідником 0,5 см та 3 см відповідно. Сенсор має динамічний діапазон від 0 до 9 мТл, що відповідає постійному струму від 0 до 1200 А.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати бакалаврської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно.

Структура і обсяг роботи. Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 4 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Багатофункціональні магніточутливі матеріали

Зростаючий попит на інтелектуальні багатофункціональні матеріали з адаптивними фізичними властивостями стимулював інтенсивні дослідження в сенсорних технологіях, гнучкій електроніці та адаптивних системах накопичення енергії [1-4]. Серед них магніточутливі матеріали є особливо перспективними завдяки своїй здатності змінювати механічні та електричні властивості у відповідь на зовнішні подразники, пропонуючи різноманітне застосування в біомедичних сенсорах [5], м'якій робототехніці [6] та активному контролю реології цементних матеріалів [7].

Традиційні магнітореологічні (MR) суспензії [8-10] та електрореологічні (ER) рідини [11] були широко досліджені на предмет їхньої залежності від поля поведінки. Незважаючи на значний прогрес у матеріалах, що реагують на поле, залишається кілька критичних проблем у розробці матеріалів, які одночасно досягають механічної адаптивності, електричної настроюваності та екологічної стійкості. Традиційні суспензії MR та ER мають рідинну основу, що створює проблеми, пов'язані з довгостроковою стабільністю, седиментацією та необхідністю спеціалізованих систем утримання [12]. Ці фактори значно обмежують їх використання в носимій електроніці, гнучких пристроях та інтелектуальних механічних системах, де важлива стабільна продуктивність. Крім того, існуючі матеріали MR та ER зазвичай реагують або на магнітні, або на електричні поля [13]. Однак, існує кілька винятків, які успішно поєднують як багатопольову чутливість, так і структурну стабільність в межах однієї матеріальної системи [14].

Крім того, більшість суспензій базуються на синтетичних полімерах та складних хімічних зв'язуючих речовинах. Це призводить до екологічних проблем щодо утилізації та довгострокового впливу на навколишнє середовище. Вбудовані мікрочастинки, які визначають чутливість суспензії до зовнішніх полів, часто виробляються або хімічними [15], або фізико-хімічними методами синтезу [16]. Хімічний синтез, хоча й здатний створювати мікрочастинки з подвійною функціональністю, часто ускладнюється використанням складних процесів та екологічно небезпечних реагентів. Як наслідок, відбувся зсув до більш стійких альтернатив, таких як фізичний синтез на основі плазми [17] або зелений синтез з використанням відходів природних матеріалів [18]. Ці методи забезпечують масштабований

та екологічно чистий підхід до виробництва мікрочастинок магнетиту (ММЧ) з матеріалів, що підлягають вторинній переробці. До них належать цибуля, картопля, чай, листя маринги та гахару, або відходи вуглецевої сталі.

Це дослідження має на меті подолати екологічні та технологічні проблеми, пов'язані з традиційними методами синтезу частинок. Тут ми розробляємо багатофункціональні, стабільні та недорогі гібридні магніточутливі композити (hMRC), що складаються з компонентів, що підлягають переробці. ММР синтезуються за допомогою плазмового процесу, який переробляє стрижні з вуглецевої сталі, що використовуються в цивільному будівництві, зменшуючи відходи матеріалів та вплив на навколишнє середовище. У композитах як матричні матеріали використовуються комкозитний матеріал та бавовняна тканина, обидва з яких є комерційно доступними та придатними для переробки. Комкозитний матеріал забезпечує стабільне гідрофобне середовище, яке зменшує осідання та агрегацію частинок завдяки своїй високій в'язкості та природному жировому складу. Його напівтвердий стан забезпечує рівномірний розподіл ММР. Досліджуючи взаємозв'язок між складом матеріалу, зовнішніми полями та електричною поведінкою, робота [19] сприяє розробці стійких, багатофункціональних матеріалів для адаптивних пристроїв. Ці результати мають потенційне застосування в автомобільних сенсорах, носимій електроніці, м'якій робототехніці та системах накопичення енергії, де налаштовувані властивості матеріалу є важливими для оптимізації продуктивності.

1.2 Тонкоплівкові магніточутливі сенсори Холла

Попит на компактні, багатофункціональні сенсори магнітного поля різко зріс завдяки їх широкому застосуванню в таких галузях, як Інтернет, інтелектуальні пристрої та енергетичні мережі [20]. Тонкоплівкові пристрої, що використовують такі явища, як аномальний ефект Холла (АНЕ), анізотропний магнітоопір (AMR), гігантський магнітоопір (GMR) та тунельний магнітоопір (TMR), поширені у виробництві комерційних магнітних сенсорів [21]. Для досягнення інтегрованого багатодіапазонного детектування необхідна вертикальна структура. Однак, сенсори магнітоопору, що характеризуються складними структурами та кількома температурами відпалу, створюють значні труднощі для такої інтеграції [22]. На противагу цьому, сенсор АНЕ має більш просту структуру, що спрощує процеси проектування та виробництва.

На рисунку 1.1а зображено схематичну діаграму епітаксійно-епітаксійного випромінювання (АНЕ) плівок NiCo_2O_4 (NCO), що використовуються в детекторних застосуваннях з різною чутливістю. Чутливість та діапазон обмежені внутрішніми властивостями тонкої плівки, такими як коерцитивне поле та опір Холла [22]. Основний підхід до контролю магнітної анізотропії в епітаксально вирощених тонких плівках NCO полягає в регулюванні параметрів росту, таких як температура осадження та товщина малюнка плівки. Ці коригування можуть впливати на енергію магнітної анізотропії, тим самим впливаючи на коерцитивне поле та магнітоопір Холла, як показано в попередніх дослідженнях [23]. Суть цих методів маніпулювання полягає в контролі постійних кристалічної решітки плівки для зміни внутрішніх напружень, а отже, і в регулюванні енергії перпендикулярної магнітної анізотропії плівок NCO. Як показано на рисунку 1.1b, модуляція напружень плівки шляхом застосування додаткової деформації та регулювання товщини плівки є звичайним методом налаштування діапазону вимірювання магнітних сенсорних плівок. Наприклад, стискальна деформація, викликана епітаксійною невідповідністю, зменшує площинну постійну решітки ($a < a_0$) та збільшує позаплощинну константу ($c > c_0$), підвищуючи чутливість завдяки магнітній анізотропії, зумовленій деформацією. Збільшення товщини плівки послаблює деформацію, поступово відновлюючи постійні решітки до значень в об'ємному напрямку, що розширює діапазон вимірювань ціною зниження чутливості. Літери «a» та «c» на рисунку 1.1b позначають площинну та позаплощинну постійні решітки відповідно. Нижні індекси вказують на різні значення. «Товщина» стосується товщини епітаксальної плівки.

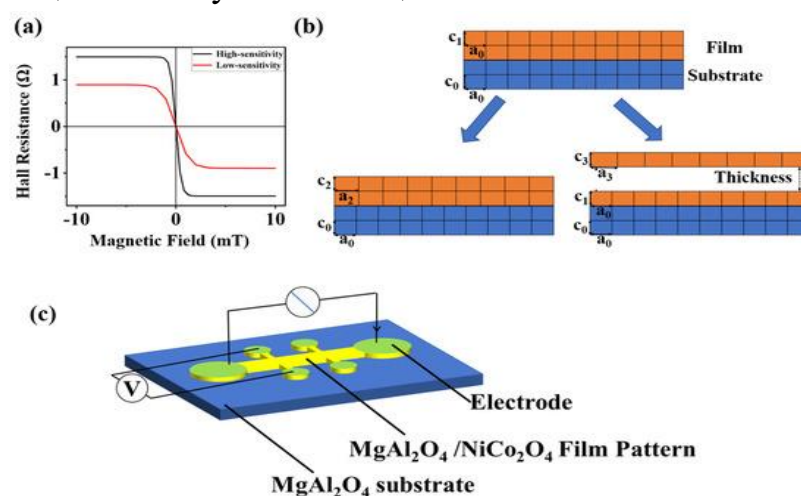


Рисунок 1.1 – (а) Принципова діаграма, що ілюструє різні сигнали опору Холла з високочутливих та низькочутливих профілів. (б) Основні методи регулювання напруженого стану плівки. (с) Принципова діаграма одноструктурного сенсора АНЕ

Дослідження показали, що діапазон виявлення тонкоплівкових сенсорів NCO можна точно налаштувати, керуючи вхідним струмом, що підкреслює потенціал розширення можливостей виявлення одноструктурних АНЕ-сенсорів [22]. Однак значно розширити діапазон виявлення в межах певного діапазону чутливості складно через їх взаємодію. Таким чином, досягти бажаного діапазону виявлення та точності одночасно з одноструктурного АНЕ-сенсора є складним завданням. Це дослідження демонструє, що застосування додаткового напруження шляхом стратегічного покриття зростанням ідентичних структур плівки MgAl_2O_4 (MAO) дозволило подальше уточнення коерцитивної сили та опору Холла в плівках NCO. Була розроблена гетероструктура MAO(10)/NCO(5)/MAO, де цифри в дужках представляють товщину кожного шару в нанометрах, що дозволяє досягти цільової чутливості та лінійного діапазону для виявлення магнітного поля шляхом модуляції вхідного струму. Спираючись на цю основу, поверх існуючої структури було нанесено наступний шар плівки NCO. Такий багатошаровий підхід призвів до створення сенсора, здатного до надвисокої чутливості, що реєструє 10 000 В/(АТ), та надширокого діапазону вимірювання ± 1000 мТл в межах окремих шарів одного й того ж сенсора. Цей прогрес бездоганно узгоджується з попереднім обговоренням простоти структури та методичного контролю магнітної анізотропії за допомогою міжшарового напруження, що підкреслює послідовний прогрес у напрямку реалізації сенсорів з підвищеною чутливістю та розширеним діапазоном виявлення в області вимірювання магнітного поля.

Спостерігається, що коерцитивне поле АНЕ у плівках NCO можна додатково регулювати шляхом вирощування плівок MAO, показаних на рисунку 1.2а. Петля гістерезису мала майже нульове коерцитивне поле після вирощування плівок MAO товщиною 10 нм або 20 нм поверх попередніх плівок, що відповідає вимогам магнітних сенсорів. Рисунок 1.2с показує, що коерцитивне поле гетероструктури швидко зменшувалося зі збільшенням товщини MAO. Швидкість відновлення стабілізувалася після того, як плівки MAO досягли 10 нм. Статистичні результати для насиченого опору Холла та поздовжнього опору кожної гетероструктури представлені на рисунку 2d. Ми спостерігали, що насичений опір Холла позитивно корелював з поздовжнім опором при кімнатній температурі, що узгоджується з попередніми дослідженнями [11]. Для аналізу напруженого стану плівок NCO використовувалися методи картування взаємного простору (RSM), як показано на рисунку 2b. Ми спостерігали, що у всіх гетероструктурах плівки NCO були повністю епітаксially вирощені на підкладках MAO, з площинними постійними решітки, зафіксованими на рівні 8,08 Å завдяки

узгодженню решіток. Однак позаплощинні постійні решітки (вісь c) плівок NCO змінювалися з товщиною верхнього шару MAO. Коли товщина MAO збільшувалася від 0 нм до 20 нм, вісь c зменшувалася з 8,18 Å до 8,16 Å, наближаючись до об'ємної постійної решітки NCO (8,15 Å). Це зменшення осі c свідчило про поступову релаксацію розтягу вздовж позаплощинного напрямку, оскільки шар MAO потовщувався. Стискаюча площинна напруга від підкладки MAO індукувала перпендикулярну магнітну анізотропію (РМА) у плівках NCO [12]. Зменшення осі c з товстішими шарами MAO послаблювало цю РМА, що безпосередньо корелювало зі спостережуваним зменшенням коерцитивного поля (рис. 1.2 с). Крім того, поздовжній опір плівок NCO демонстрував немонотонну тенденцію (рис. 1.2 d). Спочатку опір збільшувався через зменшення кількості кисневих вакансій у NCO під час росту MAO за високого тиску кисню, змінюючи валентний стан Ni. Зі збільшенням товщини MAO домінувала релаксація деформації, зменшуючи спін-орбітальне розсіювання та знижуючи опір. Ця взаємодія між модуляцією кисневих вакансій та релаксацією деформації пояснює поведінку опору [13].

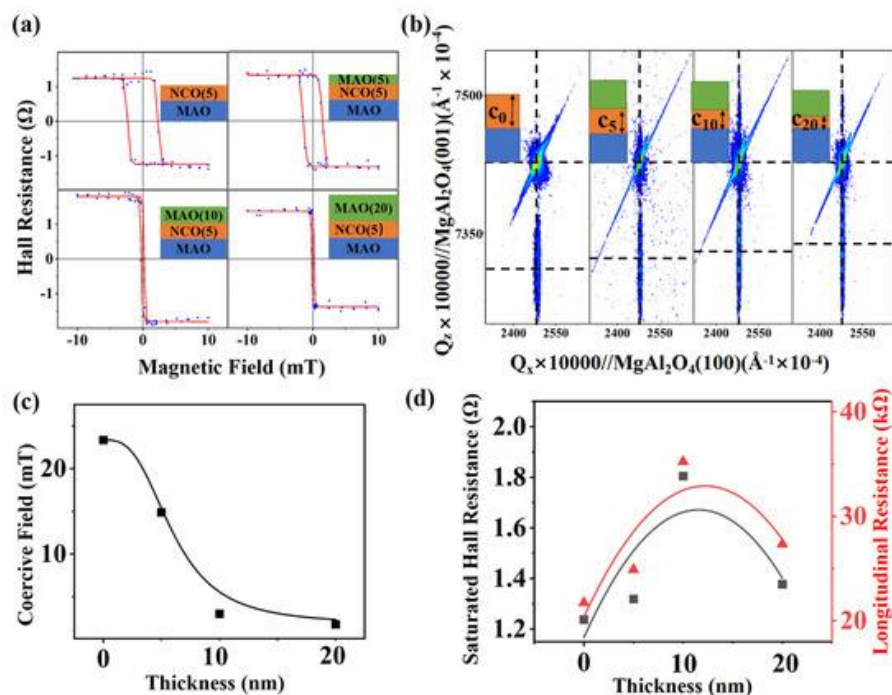


Рисунок 1.2 – (а) Залежність опору Холла від гістерезису магнітного поля чотирьох типів гетероструктур за кімнатної температури під дією вхідного струму 0,5 мА. (б) Картування взаємного простору, отримане навколо плівок NCO(206) у чотирьох типах гетероструктур. Вставки показують зміну постійної решітки (c – позаплощинна постійна решітки. Значення у правому нижньому куті стосується товщини плівок MAO). (с) Товщина плівок MAO впливає на коерцитивне поле стрижня Холла. (d) Товщина плівок MAO впливає на насичений опір Холла та поздовжній опір стрижня Холла

Щоб забезпечити перпендикулярність магнітного поля до поверхні сенсора, ми розмістили сенсор всередину концентратора. Логіка роботи двошарового сенсора проілюстрована на рисунку 1.3b. Під час нормальної роботи схеми слабе магнітне поле ($\sim 0,1$ мТл), що генерується лінією електропередачі, потрапляє в діапазон виявлення обох шарів. Вища чутливість нижнього шару забезпечує точний моніторинг струму. Коли виникає коротке замикання, результуючий сплеск струму генерує магнітне поле, що перевищує діапазон $\pm 0,1$ мТл нижнього шару. Однак надширокий діапазон верхнього шару (± 1000 мТл) залишається функціональним, викликаючи сигнал тривоги короткого замикання. Умови помилки були визначені наступним чином: якщо верхній шар перевищує свій діапазон, тоді як нижній шар працює нормально, сигналізується аномалія сенсора; а якщо обидва шари перевищують свої діапазони, це вказує на екстремальну несправність (наприклад, катастрофічне перевантаження по струму або пошкодження сенсора), що вимагає перевірки на місці.

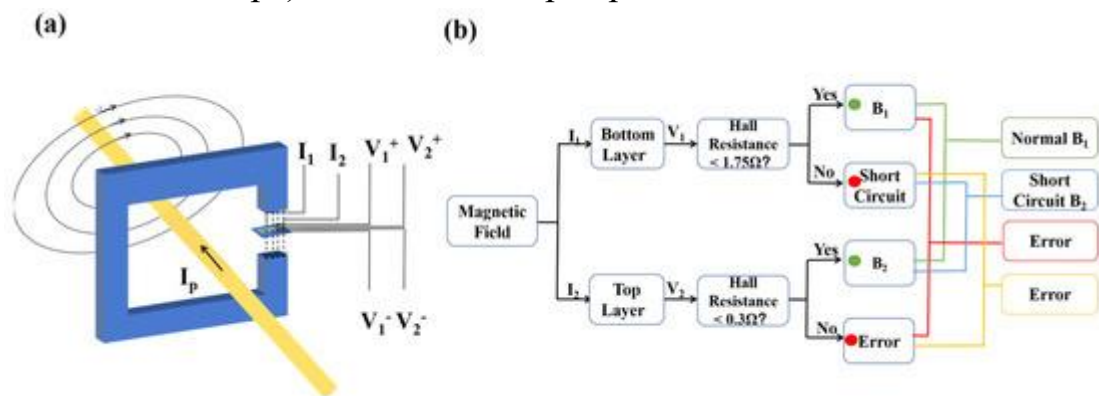


Рисунок 1.3 – (а) Принципова схема з'єднань сенсора. (б) Логіка виходу двошарового сенсора АНЕ з багатофункціональним моніторингом

Архітектура двошарового сенсора АНЕ, розроблена в цьому дослідженні, безпосередньо вирішує критичну проблему одночасного підвищення точності вимірювання та діапазону виявлення в зондуванні магнітного поля. Інтегруючи вертикально розташовані структури з стрижнями Холла з різною товщиною шарів NCO (нижній шар 5 нм та верхній шар 6 нм), розділених ізоляційною прокладкою MAO товщиною 10 нм, ми досягли взаємодоповнюючих характеристик продуктивності, які перевершили характеристики звичайних одношарових сенсорів. Для слабких магнітних полів, таких як сигнал 0,1 мТл, що генерується струмами сітки 1~50 А, нижній шар забезпечував чутливість 10 000 В/(А·Тл) у діапазоні $\pm 0,1$ мТл, що дозволяло здійснювати високоточний моніторинг. Натомість верхній шар розширював можливості виявлення до ± 1000 мТл зі зниженою чутливістю 0,3 В/(А·Тл), забезпечуючи надійну роботу під час коротких

замикань або екстремальних перевантажень по струму. Ця функціональність двох діапазонів усуває традиційний компроміс між чутливістю та діапазоном, властивий одноструктурним сенсорам АНЕ. Ця архітектура дозволяє здійснювати багатфункціональний моніторинг нормальних струмів, коротких замикань та аномалій сенсорів, використовуючи взаємодоповнюючі діапазони та чутливість двошарової конструкції. Електрична ізоляція спейсера МАО забезпечує незалежну роботу двох шарів, тоді як плівки NCO з модульованою товщиною забезпечують чіткі магнітні відгуки. Ця архітектура унікальним чином поєднує точність та широту охоплення, виконуючи обіцянку назви щодо підвищеної точності та діапазону виявлення магнітного поля.

1.3 Магніточутливі композитні матеріали

Електричні властивості ММП вимірюються за температури 24 °C за допомогою методу плоского конденсатора (ПК) [24]. Результати наведено в таблиці 1.1 та показують, що всі електричні властивості залежать від природи використаних матеріалів. Ця залежність виникає внаслідок утворення ММП провідних наномікрошарів [23], між якими оксиди діють як діелектричні матеріали. Ці мережі мікроконденсаторів призводять до еквівалентної ємності (C) та ϵ' до 2,58 рази вище, ніж у смальці.

Таблиця 1.1 - C , коефіцієнт діелектричних втрат (D), відносна діелектрична проникність (ϵ'), та коефіцієнт діелектричних втрат ($\epsilon'' = \epsilon' D$) з ММП, та бавовняної тканини

Component	C , (pF)	D	ϵ'	ϵ''
MMPs	45.50	0.1007	16.4255	1.6540
Lard	17.65	0.0209	6.3717	0.1332
Cotton fabric	19.22	0.1783	1.4473	0.2581

Однак, значення ϵ' для бавовняної тканини значно нижча порівняно з ММП та смальцем. Ця різниця зумовлена наявністю повітря у порожніх просторах між волокнами тканини. З таблиці також видно, що ϵ'' 'значення ММП приблизно на порядок вищі, ніж значення як для свинячого сала, так і для бавовняної тканини. В останньому випадку значення ϵ'' 'визначається вологістю, присутньою в бавовняних мікроволокнах.

Зазначені кількості ММП та композитного матеріалу, перелічені в таблиці 1.2, вводяться в циліндр Берцеліуса та отримують суміш (рис.

1.4, а). Потім суміш гомогенізують при температурі 220–250 °С протягом 500 с, а потім охолоджують до кімнатної температури.

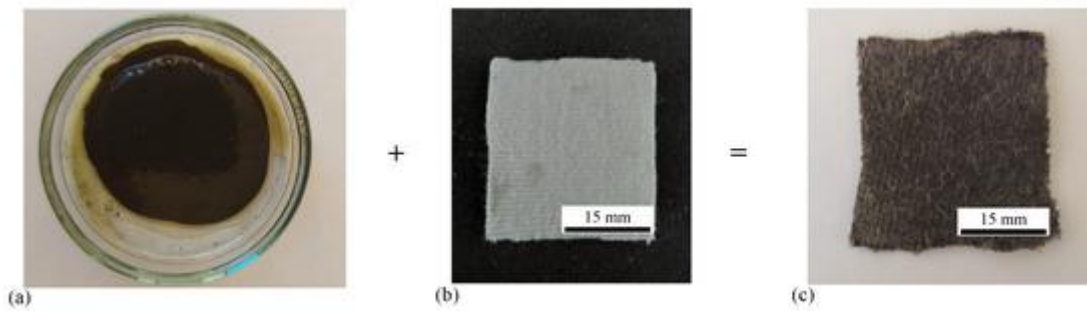


Рисунок 1. 4 – Приготування hMRC. (а) Суміш MMP + композитного матеріалу. (б) Бавовняна тканина. (с) hMRC

Таблиця 1.2 - Об'єми та об'ємні частки композитного матеріалу та ММП у суміші композитного матеріалу та ММП (рис. 1.4, а)

$V_{\text{lard}} (\text{cm}^3)$	$V_{\text{MMPs}} (\text{cm}^3)$	$\Phi_{\text{lard}}^V (\% \text{ vol.})$	$\Phi_{\text{MMPs}}^V (\% \text{ vol.})$
6	4	60	40

Після цього два однакові шматки бавовняної тканини вирізають розміром 30 мм × 30 мм × 0,6 мм (рис. 1.4b), а потім замочують у суміші MMP + композитного матеріалу для створення зразків hMRC (рис. 1.4с), що позначаються hMR.C1C1 та mMPC2C2. Об'єми та об'ємні частки цих компонентів наведено в таблиці 1.3. Об'ємні співвідношення композитного матеріалу, MMP та CF, що використовуються в hMRC1C1 та mMPC2C2 були обрані на основі попередніх випробувань для забезпечення як структурної однорідності, так і ефектної реакції на поле. Базовий склад (hMRC1C1) пропонує добру механічну цілісність та електричну чутливість, тоді як підвищена частка MMP у hMRC2C2 дозволяє оцінити вплив вищого вмісту магнітного наповнювача на регульованість електричних властивостей. В обох випадках об'єм свинячого сала підтримувався постійним для полегшення порівняння.

Таблиця 1.3 - Об'єми, об'ємні частки композитного матеріалу, ММП та мікрОВОЛОКОН, що використовуються для приготування hMRC1C1 та mMPC2C2. M_s — намагніченість насичення

	$V_{\text{lard}} (\text{cm}^3)$	$V_{\text{MMPs}} (\text{cm}^3)$	$V_f (\text{cm}^3)$	$\Phi_{\text{lard}} (\% \text{ vol.})$	$\Phi_{\text{MMPs}} (\% \text{ vol.})$	$\Phi_f (\% \text{ vol.})$	$M_s (\frac{\text{Am}^2}{\text{kg}})$
hMRC ₁	0.20	0.14	0.14	42	29	29	9.68
hMRC ₂	0.31	0.28	0.14	42	39	19	13.12

Структурні властивості hMRC

Кристалічна структура, фаза та морфологія hMRC1C1 та mMPC2C2 досліджуються за допомогою методів рентгенівської дифракції (XRD) та скануючої електронної скануючої мікроскопії (SEM). Рентгенівський дифракційний аналіз підтвердив кубічну магнетитову фазу в обох гMPC1C1 та mMPC2C2 (Рисунок 1.5, а). Різниця в інтенсивності піків свідчить про варіації розміру кристалітів (~ 3 мкм для MMP та MMP зі смальцем) та фазових взаємодій. Дані SEM (Рисунок 1.5, б) показують наявність MMP з розмірами від кількох мікрометрів до кількох сотень мікрометрів, прилиплих до бавовняних мікрОВОЛОКНІВ. Цьому сприяє наявність композитного матеріалу, який покриває MMP.

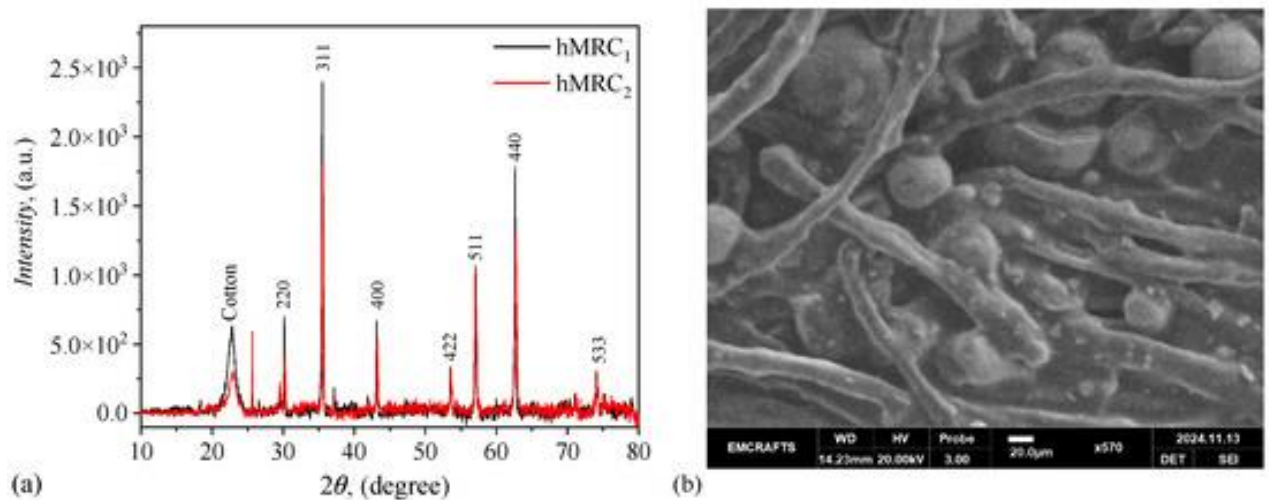


Рисунок 1.5 – (а) Рентгенівська дифракція від hMRC1C1 та mMPC2C2 (б) SEM з hMRC1C1 сферичні структури — ММР; видовжені структури — бавовняні мікрОВОЛОКНА

Магнітні властивості hMRC

Крива намагнічування MMP (M_s ПМсП; Рисунок 1.6) отримано за допомогою експериментальної установки, описаної в посиланнях. Крива намагнічування для суміші MMP + лярд (M_s PLMсPL; Рисунок 1.6) отримується за допомогою співвідношення $\mu_0 M_{s_{PL}} = \mu_0 \Phi B_{PL} M_s$, де ΦB_{PL} наведено в таблиці 1.2. Криві намагнічування для hMRC1C1 та mMPC2C2 (M_{sh} MRC1MchMRC1 і M_{sh} MRC2MchMRC2; Рисунок 1.6), отримані за допомогою аналогічного співвідношення. Суміш MMP + композитний матеріал, у якій відсутня бавовняна матриця, демонструє рівні намагніченості між рівнями hMRC та MMP. Нижча намагніченість hMRC (порівняно з MMP) зумовлена зменшенням вирівнювання частинок бавовняною матрицею.

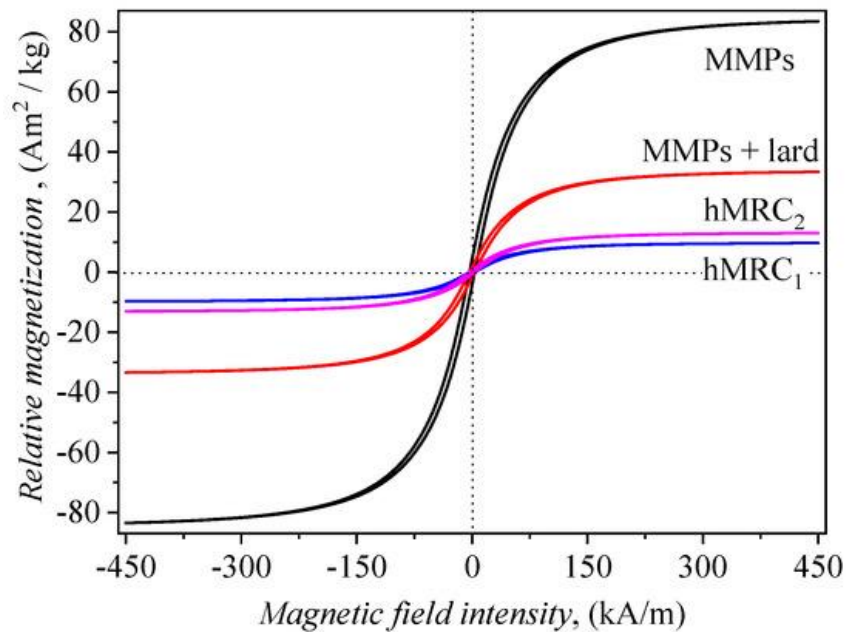


Рисунок 1.6 – Криві намагнічування для hMRC1C1 та mMPC2C2

Ці властивості намагнічування відіграють вирішальну роль у практичному застосуванні hMRC. Наприклад, здатність регулювати намагніченість за допомогою складу матриці та вмісту магнетиту дозволяє налаштовувати чутливість та швидкість реагування механічних сенсорів, таких як сенсори деформації або напруження. Зменшений зв'язок у суспензіях, вбудованих у тканину, підвищує стабільність за різних механічних умов, що робить їх придатними для матеріалів, що реагують на поле, у застосуваннях з точним контролем реологічної та магнітомеханічної поведінки.

Електричні властивості FC

Вимірювання електричних властивостей ММП, композитного матеріалу та бавовняної тканини проводилися за допомогою FC з мідними пластинами. Відстань між пластинами була встановлена на $h_0 = 2 \times 10^{-3}$ м для ММП та сала. Для CF розділення визначалося товщиною матеріалу, приблизно $0,6 \times 10^{-3}$ м. Ці значення послідовно використовуються нижче для розрахунку електричної ємності, опору та діелектричної проникності. Усі вимірювання проводилися за контрольованої температури 24 °C. Ця температура підтримувалася протягом усіх етапів підготовки зразка та електричної характеристики для забезпечення узгодженості, особливо враховуючи температурну чутливість в'язкості.

C та R вимірюються у статичному магнітному полі, накладеному на статичне поле стискаючих сил. Статичне магнітне поле збільшується з кроком 10 мТл до максимального значення 150 мТл. Зміна ємності з B для

різних значень F , тобто функція $C = C(B)$ показано на рисунку 1.7. Аналогічно, опір $R = R(B)$ показано на рисунку 1.8.

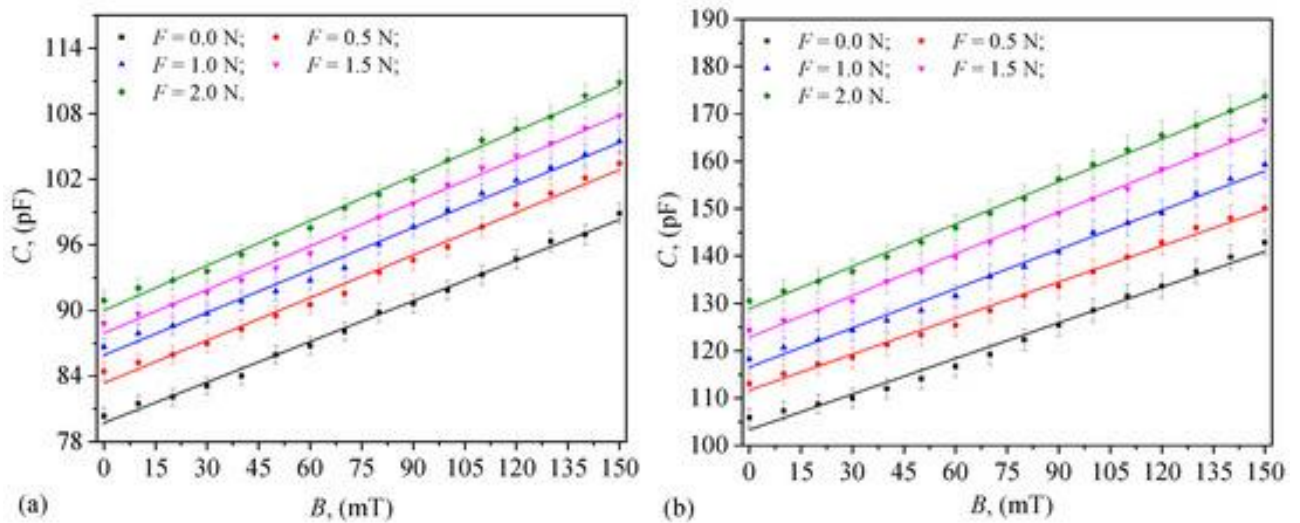


Рисунок 1.7 – Ємність як функція щільності магнітного потоку B для фіксованих значень прикладеної сили стиснення F . Вимірювання виконано в змінному електричному полі 1 кГц, температурі 24 °С та напрузі 0,8 В (а) FC1C1(з 29 об.% ММП). (б) FC2C2(з 39 об.% ММП). Кожна крива відповідає різним значенням F , як позначено. Вертикальні стовпчики — стандартні відхилення

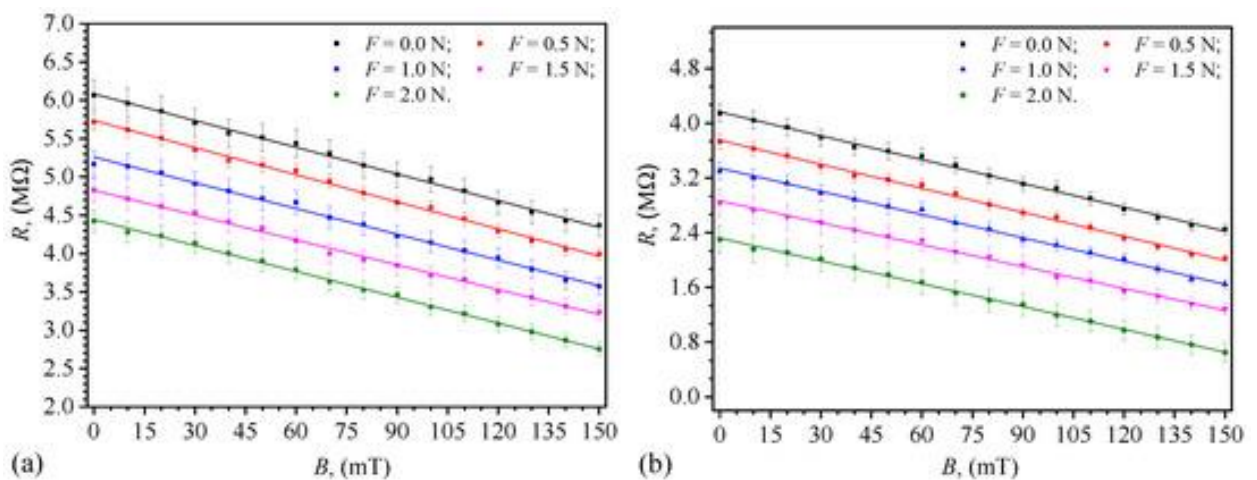


Рисунок 1.8 – Електричний опір R як функція щільності магнітного потоку B для фіксованих значень сили стиснення F

Вимірювання ємності показують чітку залежність як від B , так і від F . У першому випадку залежність є квазілінійною. При 150 мТл C коливається від 139 пФ ($F = 0$ Ф) до 171 пФ ($F = 2$ Ф). Це демонструє вищу загальну ємність та чутливість для FC2 через підвищений вміст магнетиту.

Сукупний вплив B та F посилює поляризацію всередині суспензій. Ці зміни свідчать про те, що шляхом налаштування магнітних та механічних параметрів можна точно контролювати діелектричну реакцію конденсаторів. Така настроюваність є перевагою для сенсорів механічної деформації, де чутливість до невеликих змін сили є критично важливою. Наприклад, у FC2C2, ємність збільшується приблизно на 30% при застосуванні сили 2 Н при $B = 0$ мТ, порівняно з приблизно 19% у FC1C1.

Вимірювання опору конденсаторів демонструють сильну залежність як від B , так і від прикладеної сили стиснення. Опір зменшується квазілінійно зі збільшенням магнітного поля для обох суспензій, що вказує на те, що вирівнювання частинок магнетиту під дією магнітного поля покращує провідні шляхи всередині гібридної матриці. Цей ефект ще більше посилюється силами стиснення, які покращують контакт частинок і зменшують ізоляційні порожнини всередині структури. Наприклад, у FC1C1, R падає з 6,156 МОм при $B = 0$ мТ та $F = 0$ Н до 4,425 МОм при $F = 2$ Н. Аналогічно, у FC2C2, R зменшується з 4,278 МОм до 2,182 МОм за тих самих умов.

Порівнюючи два конденсатори, FC2C2 демонструє нижчий опір за всіх польових умов через вищу об'ємну частку магнетиту в hMRC2C2. Підвищена концентрація провідних частинок знижує ефективний питомий опір матеріалу, збільшуючи щільність шляхів струму. Така поведінка також свідчить про те, що FC2C2 більш чутливий до впливу як механічних, так і магнітних полів, оскільки провідна мережа стає стабільнішою та ефективнішою в умовах комбінованого поля.

1.4 Магніторезистивні сенсори

Магнітні сенсори все частіше інтегруються в різні електронні пристрої, відіграючи вирішальну роль у різних галузях [1-4]. Ці сенсори використовуються не лише в електронних компасах [7] та навігаційних системах, які базуються на виявленні магнітного поля Землі, але й служать сенсорами розпізнавання руху у середовищах віртуальної реальності (VR) [5]. Крім того, вони є важливими компонентами в передових технологіях, таких як біосенсори [18-21], тактильні сенсори для робототехніки [9], пристрої магнітної пам'яті [23] та спінтронні пристрої [11]. Магнітні сенсори зазвичай класифікуються за принципами їхньої роботи на напівпровідникові сенсори Холла [25] та магніторезистивні сенсори [27].

Магніторезистивні сенсори класифікуються на кілька типів залежно від їхніх фізичних принципів: анізотропний магнітоопір (AMR) [28], гігантський магнітоопір (GMR) [17], тунельний магнітоопір (TMR) [29] та планарний

магнітоопір Холла (PHMR) [29]. Сенсори на основі GMR та TMR зазвичай використовуються у високочутливих застосуваннях завдяки їх високому коефіцієнту магнітоопору, але відносно високий рівень шуму може обмежувати їхню продуктивність. Навпаки, сенсори PHMR пропонують переваги простої структури, легкості виготовлення та економічної ефективності [29]. Зокрема, сенсори PHMR забезпечують чудову лінійну реакцію на магнітні поля, високу чутливість до сигналу, низьку напругу зміщення та чудове співвідношення сигнал/шум [30]. Крім того, сенсори PHMR демонструють чудову стабільність до змін температури навколишнього середовища, що призвело до їх зростаючого використання в різних застосуваннях.

Продуктивність сенсорів PHMR визначається формою та структурою тонких плівок сенсора. Для максимізації вихідної напруги сенсора було досліджено різні конструкції, такі як хрестоподібні [30], похилі [31] та сенсори типу мосту Уїтстона [32]. Структурно магнітні сенсори, які лінійно реагують на магнітні поля без гістерезису, були розроблені за допомогою двошарової структури, заснованої на обмінному зміщенні між феромагнітними та антиферомагнітними матеріалами [23]. Крім того, були проведені дослідження з оптимізації антиферомагнітних матеріалів для підвищення чутливості сенсора або покращення термічної стабільності шляхом включення немагнітного шару між феромагнітним та антиферомагнітним шарами [31].

У сенсорах, що використовують одношарову структуру NiFe, вихідний сигнал визначається густиною струму та властивостями магнітоопору, незалежно від режиму керування (постійний струм (CC) або постійна напруга (CV)). Однак для багатошарових магніторезистивних сенсорів режим керування впливає як на густину струму, так і на вхідну напругу в шарі NiFe, що призводить до відмінностей у поведінці сенсора. Хоча значні дослідження були зосереджені на оптимізації феромагнітних матеріалів, які визначають продуктивність сенсора, більшість досліджень в основному досліджували режим CC, особливо щодо змін товщини шару NiFe [32]. З іншого боку, дослідження структурної оптимізації для режиму CV, який широко використовується в промислових застосуваннях, залишаються недостатньо дослідженими.

У цьому дослідженні систематично проаналізовано продуктивність та характеристики двошарових PHMR-сенсорів у різних режимах керування шляхом зміни товщини шару NiFe від 5 нм до 35 нм як у режимах CC, так і в режимах CV. Були оцінені робочі характеристики сенсора та проведено моделювання щільності струму, щоб зрозуміти, як товщина NiFe впливає на продуктивність сенсора та розподіл щільності струму. Також були проаналізовані магнітні властивості як функція товщини NiFe, щоб оцінити їх вплив на робочий діапазон та чутливість сенсора, пропонуючи рекомендації щодо проектування для оптимальної продуктивності. Це

дослідження пропонує стратегії для підвищення продуктивності PHMR-сенсорів та сприяє розробці високочутливих магнітних сенсорів шляхом оптимізації режимів керування в різних умовах товщини. Результати дослідження нададуть фундаментальні дані для майбутнього проектування та застосування спінтроннічних пристроїв.

Для аналізу характеристик залежно від режиму керування було виготовлено двошаровий PHMR-сенсор з перехресним малюнком, показаний на рисунку 1.9а. Підкладку SiO_2 було виготовлено методом мокрого окислення, а тонкі плівки були нанесені розпиленням у послідовності Ta (5 нм)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (x нм)/ $\text{Ir}_{25}\text{Mn}_{75}$ (10 нм)/Ta (5 нм). Тут Ta служив як зародковим, так і покривним шарами. $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ було обрано як активний феромагнітний шар завдяки його чудовим магнітно-м'яким властивостям, включаючи високу магнітну проникність для швидкої реакції на зовнішні магнітні поля та низьку коерцитивну силу для мінімізації магнітного гістерезису. $\text{Ir}_{25}\text{Mn}_{75}$ було обрано як антиферомагнітний шар товщиною 10 нм для індукції обмінного зміщення та вирівнювання намагніченості шару $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ вздовж легкої осі. Така конфігурація мінімізує гістерезис вздовж твердої осі, забезпечуючи лінійну магнітну реакцію та покращуючи надійність і продуктивність сенсора [32]. Товщина шару $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ змінювалася від 5 нм до 35 нм, досягаючи точки насичення для $\Delta\rho$. Хрестоподібна форма сенсора була розроблена з розмірами лінії та ширини, встановленими на рівні 200 мкм кожна, а електроди подачі струму були розміщені вздовж осі x, а електроди вимірювання напруги - вздовж осі y для роботи сенсора та вимірювання сигналу.

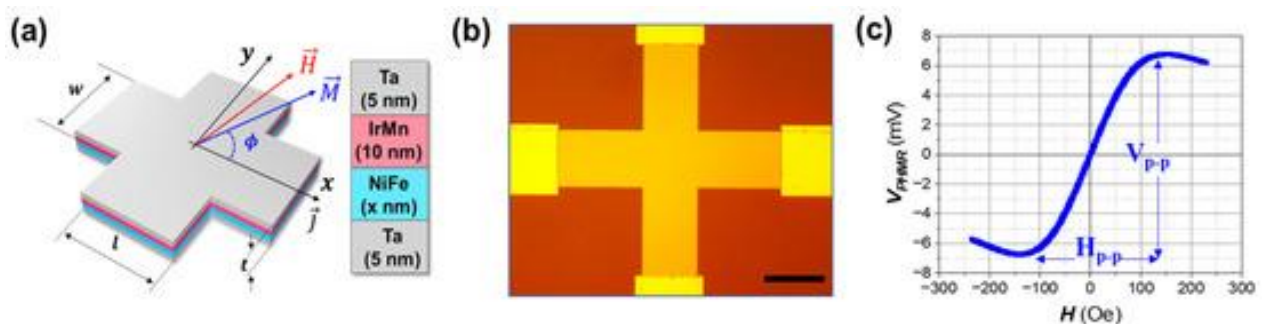


Рисунок 1.9 – (а) Схематичне зображення двошарової структури, що використовується в сенсору PHMR, що складається з Ta (5 нм)/NiFe (x нм)/IrMn (10 нм)/Ta (5 нм). Показано зовнішнє магнітне поле (H) та намагніченість (M), а також кут (ϕ) між ними. (б) Зображення оптичного мікроскопа виготовленого сенсора PHMR з перехресним переходом та масштабною шкалою 200 мкм. (с) Криві характеристик сенсора PHMR, що ілюструють вихідну напругу (V) як функцію прикладеного магнітного поля (H)

Двошарову тонкоплівкову структуру було нанесено методом магнетронного розпилення постійного струму, а під час осадження було прикладено постійне зовнішнє магнітне поле 250 Е для індукування напрямку обмінного зміщення шарів $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та $\text{Ir}_{25}\text{Mn}_{75}$. Базовий тиск здійснювався в атмосфері Ar (99,999%) під тиском 3×10^{-3} Торр. Прикладена напруга під час процесу розпилення коливалася від 200 В до 250 В, залежно від матеріалу мішені. Зокрема, потужність розпилення була встановлена на рівні 50 Вт для забезпечення оптимізованої швидкості та однорідності осадження. УФ-літографія та процеси відриву від поверхні сформували перехресний малюнок сенсора та малюнки електродів. На рисунку 1.9b показано структуру виготовленого PHMR-сенсора з перехресним малюнком.

Для характеристики виготовленого сенсора вимірювання проводилися в різних режимах керування за допомогою вимірювача джерела Keithley 2400 (Keithley Instruments, Клівленд, Огайо, США) та мультиметра HP 34401A (HP, Пало-Альто, Каліфорнія, США), керованих програмою LabVIEW. У режимі постійного струму до сенсора подавалася постійна напруга 1 мА, тоді як у режимі постійної напруги подавалася напруга 1 В. Магнітне поле прикладалося за допомогою котушок Гельмгольца в діапазоні від +300 Е до -300 Е для аналізу магнітних характеристик відносно напрямку поля. Оцінка шуму перехресного сенсора PHMR проводилася за допомогою аналізатора спектру Agilent 35670A (Agilent Technologies, Санта-Клара, Каліфорнія, США). Для вимірювання кривих гістерезису вздовж осей легкого та важкого намагнічування використовували систему вібраційного магнітометра зразка (VSM) (Lake Shore Cryotronics 7407, Lake Shore Cryotronics Inc., Вестервілл, Огайо, США).

Для моделювання змін густини струму залежно від товщини $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ було використано програмне забезпечення ANSYS Maxwell Electronics (2021 R1) , аналізуючи розподіл густини струму для тієї ж двошарової структури, що й у виготовленого сенсора. Моделювання порівнювало зміни густини струму між режимами CC та CV, що дає уявлення про те, як товщина $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ впливає на характеристики густини струму, та дозволяє проаналізувати відмінності в характеристиках сенсора залежно від режиму керування.

На рисунку 1.10a показано результати моделювання розподілу густини струму в режимі CC як функцію товщини шару $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Результати моделювання показують, що розподіл густини змінюється зі збільшенням товщини тонкої плівки. Примітно, що при товщині 5 нм спостерігалася відносно вища густина струму, а зі збільшенням товщини густина струму

поступово зменшувалася. Ця закономірність аналогічно спостерігається в буферних шарах, таких як Ta та $\text{Ir}_{25}\text{Mn}_{75}$, як показано на рисунку 1.10с.

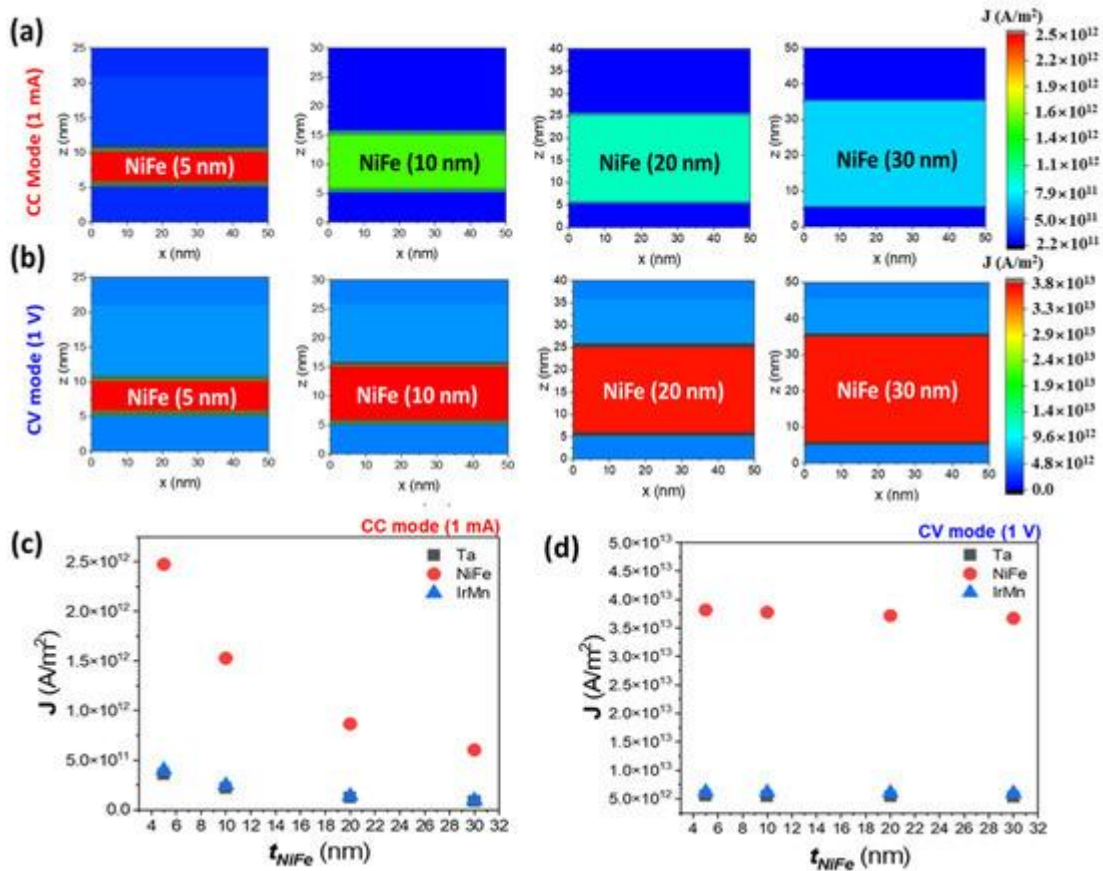


Рисунок 1.10 – Розподіл густини струму для шарів $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ різної товщини в режимах CC та CV

На рис.1.10а модельовані розподіли густини струму для шарів $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ товщиною 5 нм, 10 нм, 20 нм та 30 нм у режимі CC. Градієнт кольору відображає величину густини струму, причому вищі густини показані червоним, а нижчі – синім. Зі збільшенням товщини $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ пікові значення густини струму зменшуються, головним чином через вплив шунтуючого струму. (b) Модельовані розподіли густини струму в режимі CV. Густина струму залишається відносно постійною для всіх товщин, демонструючи мінімальні зміни зі збільшенням товщини. (c) Графік густини струму як функції товщини $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ в режимі CC та (d) в режимі CV, з чіткими маркерами, що вказують на внесок шарів Ta, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та $\text{Ir}_{25}\text{Mn}_{75}$.

1.5 Магнітометри на ефекті Холла

Магнітометри, що базуються на ефекті Холла [40], підходять для виявлення мічених молекул або білків у пристроях, що використовуються в місцях надання медичної допомоги [21], завдяки низьким енерговитратам,

простоті використання та межі рівня виявлення порядку $10 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ [23]. Існує кілька різних геометрій сенсорів магнітного поля, що базуються на ефекті Холла [26]. Класично такі сенсори мають напівпровідниковий елемент «Холла», як показано на рисунку 1.11, який може бути виготовлений у дуже малих розмірах. У магнітометрі два елементи можуть використовуватися в диференціальній системі для зменшення шуму та покращення чутливості. Традиційно ці сенсори виявлялися менш чутливими, ніж їхні магніторезистивні аналоги.

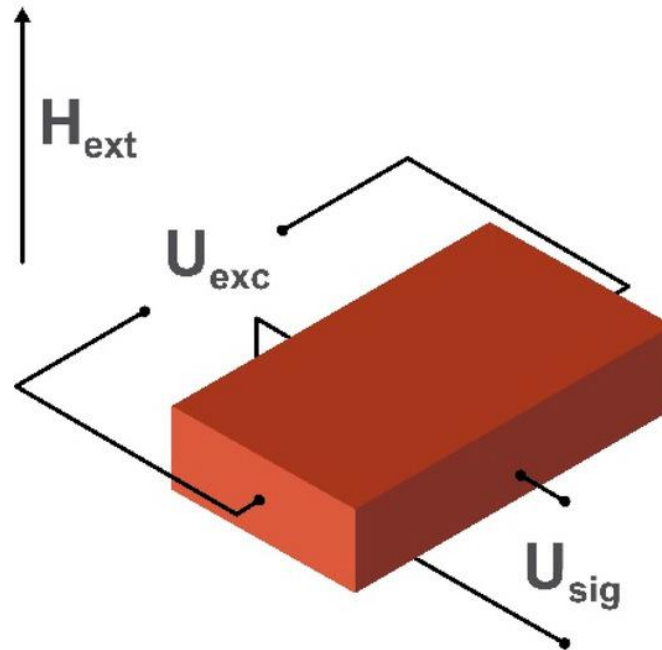


Рисунок 1.11 – Схематичне зображення чутливого елемента магнітометра на основі ефекту Холла, де прикладене зовнішнє магнітне поле H_{ext} виявляється напругою Холла U_{sig} , ортогональною до струму елемента, що створюється напругою керування U_{exc}

Принцип роботи магнітометра на ефекті Холла полягає у зміні поперечної (холлівської) напруги (U_{sig}), що виникає внаслідок спотворення змінного струму, що протікає під прямим кутом до обох цих [33]. Зміна напруги відбувається через відхилення носіїв заряду в бік матеріалу під впливом сили Лоренца. Аналізуючи зміну напруги, можна визначити амплітуду прикладеного магнітного поля.

1.6 Магнітопружні магнітометри

Магнітопружні сенсори магнітного поля [41] привернули значну увагу в галузі біомедичної інженерії завдяки можливості створення бездротових, а також пасивних пристроїв для вивчення різних біологічних параметрів [42].

Загалом, магнітопружні сенсори магнітного поля виготовляються з феромагнітних дротів або стрічок, що мають велику константу магнітострикції. Схематичне зображення чутливого елемента такого сенсора показано на рисунку 1.12.

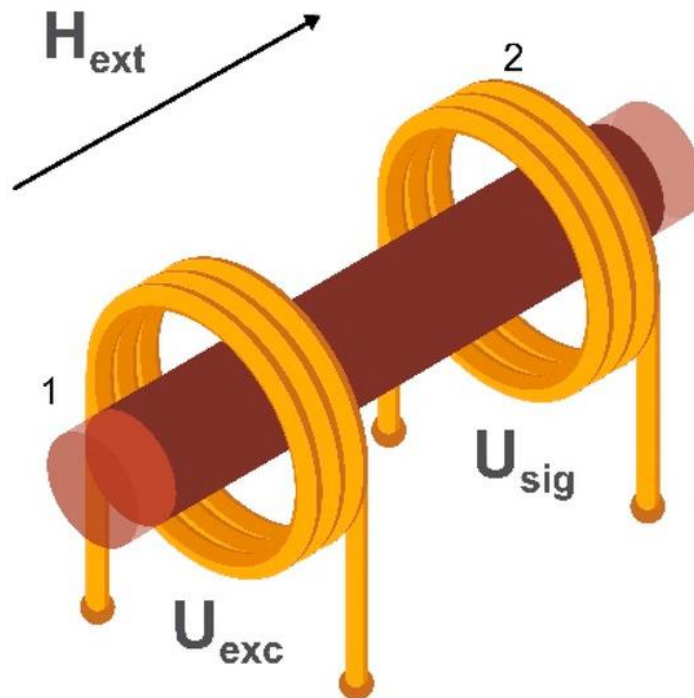


Рисунок 1.12 – Схематичне зображення чутливого елемента сенсора деформації на основі магнітопружного матеріалу, де прикладене магнітне поле, що генерується змінною напругою U_{exc} у первинній котушці (1), викликає змінну напругу U_{sig} , індуквану у вторинній котушці «детектування» (2)

Принцип роботи цих сенсорів базується на зміні сприйнятливості, а отже, і проникності матеріалу, що піддається механічному напруженню (ефект Віллари або зворотний магнітострикційний ефект) [45]. Якщо магнітопружний матеріал заряджається змінним у часі магнітним полем, магнітний потік, що проходить через цей матеріал, змінюється пропорційно прикладеному напруженню, і його можна виявити за допомогою сенсорних котушок у вигляді змінної напруги U_{sig} . Таким чином, виявлена зміна магнітного потоку відображає прикладене напруження. Оскільки цей тип сенсора потребує застосування механічного напруження, він не використовується для виявлення магнітних біосигналів. Однак магнітопружні сенсори знайшли застосування як сенсори деформації для дослідження деформації кісток під дією прикладеного напруження. Якщо таку систему помістити в зовнішнє поле H_{ext} , то зміна сприйнятливості

змінює характеристику передачі магнітопружності, що дає метод виявлення поля на додаток до виявлення механічної деформації.

На жаль, напруження, що виникають у матеріалі, впливають на його вимірювальні характеристики, тому майбутні перспективи можуть полягати в переробці схеми вимірювання та коригуванні складу матеріалу. Крім того, мініатюризація таких сенсорів значною мірою допоможе розробці багатовимірних сенсорів.

1.7 Магнітометри на основі спін-хвильової інтерферометрії

Ще один спосіб розробки високочутливого, високолокалізованого сенсора магнітного поля, запропонований для магнітоенцефалографії, базується на використанні спінової електроніки [36]. Найновіші результати досягнуті в галузі поширення та інтерференції спінових хвиль [37] та в перехресних контактах YIG [19]. Схематичне зображення чутливого елемента сенсора магнітного поля на основі спінових хвиль показано на рисунку 1.13. За кімнатної температури межа виявлення цього типу сенсора знаходиться на рівні $1 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ [20]. Він також є одним з найшвидших з точки зору накопичення даних.

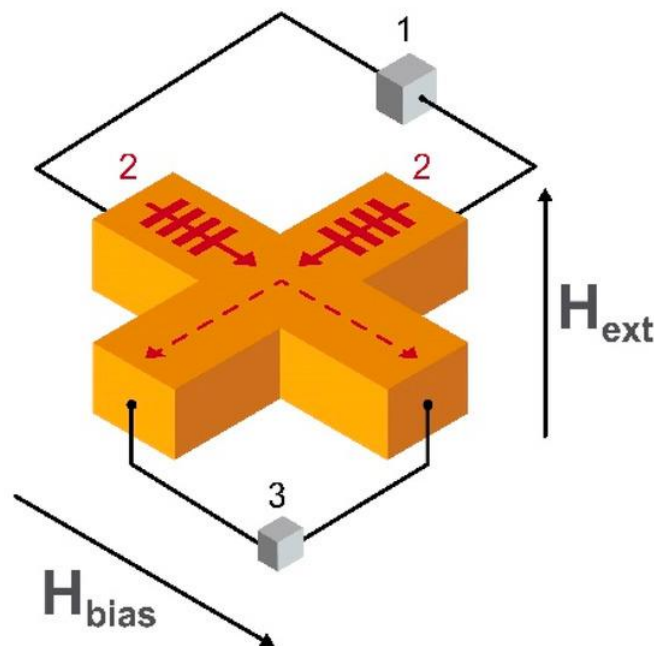


Рисунок 1.13 – Схематичне зображення чутливого елемента сенсора магнітного поля на основі спінових хвиль, що складається з генератора спінових хвиль (1), який збуджує спінові хвилі у двох антенах (2), виявлених детектором спінових хвиль (3), де H_{ext} та H_{bias} – це прикладені позаплощинні та зміщені в площині зовнішні магнітні поля відповідно

Принцип роботи базується на інтерференції спінових хвиль у схрещених антенах, виготовлених з відповідного матеріалу, розміщеного поверх магнітного матеріалу, що забезпечує постійне зміщення площинного магнітного поля $H_{\text{зміщення}}$. Коли спінові хвилі збуджуються генератором на вхідних антенах, вони поширюються через поперечний переріз до вихідних контактів, підключених до детекторів. Якщо спінові хвилі знаходяться в протифазі, вихідна напруга мінімальна, а в іншому випадку вихідний сигнал досягає свого максимуму. Це пов'язано з явищем деструктивної та конструктивної інтерференції відповідно. Фазовий зсув спінових хвиль залежить від зовнішньої позаплощинної складової зовнішнього магнітного поля $H_{\text{зовн}}$. Таким чином, вихідний сигнал пристрою пропорційний прикладеному полю.

Будучи відносно новим видом магнітометрії, сенсор магнітного поля на основі спінових хвиль має величезний потенціал для оптимізації, наприклад, у геометрії чутливого елемента. Це може забезпечити ширше покриття між сигналами поверхневої магнітостатичної спінової хвилі та сигналами зворотної об'ємної магнітостатичної спінової хвилі. Також існують можливості для подальших досліджень у галузі методів придушення шуму, регулювання магнітного поля зміщення та вибору робочої частоти.

Наприклад, у роботі [37] автори демонструють розподілене зондування магнітного поля за допомогою термічно витягнутого волокна з вбудованими фотодіодами та порожнистого хвилеводу, що містить рідину з алмазним матеріалом, що має дефекти азотних вакансій (NV). Цей метод магнітометрії базується на скануванні NV у краплі олії через порожнисте волокно. Геометрія дозволяє вимірювати магнітні поля вздовж шкали 100 м з межею виявлення $63 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$. Також у роботі [38] нещодавно було показано, що NV-центри в алмазі є хорошими кандидатами для проведення нанорозмірної ядерно-магнітно-резонансної спектроскопії. Для цього автори використовували послідовності детектування гіперполяризації з чергуванням на NV-центрах для виявлення ядерної поляризації, індукованої вздовж напрямку зовнішнього магнітного поля з поверхнею алмазу. Використання методу детектування з синхронізацією, джерела оптичної гіперполяризації та байєсівських моделей виведення (для обробки сигналів) дозволило авторам досягти результатів, порівнянних зі звичайною ядерно-магнітно-резонансною спектроскопією. Також показано детальний теоретичний аналіз використаного протоколу. Крім того, цей метод був використаний для зондування магнітних полів клітин і тканин ссавців, а корисність технології в моделі *in vitro* була продемонстрована в роботі [39]. Для цього автори створили NV-магнітомікроскоп на основі алмазного шару товщиною 4 мкм,

оптимізованого для візуалізації магнітного поля високої роздільної здатності фіксованих зразків та динамічної візуалізації живих клітин. Тим не менш, фізика виявлення на основі NV-центрів в алмазі є складною та відрізняється від зразка до зразка. Таким чином, теоретичні дослідження, що описують фізику процесів у розглянутих структурах, все ще тривають. Як приклад, одна з нещодавніх робіт наведена в посиланні [40]. Також представлено перелік теоретичних удосконалень таких параметрів, як час дефазування спіну, точність зчитування та властивості матеріалу алмазу-господаря, а також детальний аналіз різних методів зондування.

Раніше обговорювані сенсори мають обмеження щодо робочої температури або потужності оптичного збудження, а також існує вимога до сенсора магнітного поля, який працює за кімнатної температури, зберігаючи при цьому оптимальну продуктивність. Одним із найперспективніших кандидатів для цієї мети є резонаторний оптомеханічний магнітометр. Наразі він має низьке енергоспоживання, високу просторову роздільну здатність і не потребує систем охолодження. У нещодавній роботі Лі та ін. [42], де розроблявся резонаторний оптомеханічний магнітометр на основі кремнієвого чіпа, оптичний дробовий шум було придушено за допомогою фазово стисненого світла. Ця робота показує, що квантово-корельоване світло може значно покращити межу виявлення та пропускну здатність таких сенсорів. Теоретичне дослідження можливостей оптимізації резонаторного оптомеханічного сенсора магнітного поля представлено Ю та ін. [47]. Аналіз кількох геометрій чутливих елементів передбачає межу виявлення $20 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ після коригування складу чутливого елемента та процесу відпалу.

Додатковим типом магнітометра з низьким енергоспоживанням, широким температурним діапазоном та конкурентоспроможною чутливістю є магнітометр на основі спін-хвильової інтерферометрії. Одна з останніх робіт, присвячених перевагам цієї нової методики, виконана групою Балинського [27]. Мікрометровий поперечний переріз чутливого елемента $\text{Y}_3\text{Fe}_2(\text{FeO}_4)$ (площа $1,8 \text{ мм}^2$) передбачає значення межі виявлення $1 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$. Були проведені експериментальні результати для різних орієнтацій магнітного поля зміщення та порівняні з теоретичними розрахунками. Краще налаштування магнітного поля зміщення може бути здійснене за допомогою магнітних матеріалів, що мають позаплощинну намагніченість та/або за допомогою антиферомагнітних матеріалів. Однак відсутність експериментальних даних про інтерференцію спінових хвиль у таких матеріалах перешкоджає кількісному аналізу.

1.8 Висновки до розділу

У цьому розділі представлені найновіші дослідження, присвячені новим методам, матеріалам і пристроям магнітометрії, які можна впровадити в галузі IoT сенсорних мереж. Оскільки вони, як правило, високочутливі та легко об'єднуються в системи, ці методи мають багато перспектив у сприйнятті магнітних сигналів та в пристроях IoT сенсорних мереж.

2 РОЗРОБКА ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЗБОРУ ЕНЕРГІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ АВТОНОМНИХ ПРИСТРОЇВ SMART GRID IOT

Технології збору енергії стають дедалі популярнішими як потенційні джерела енергії для пристроїв Інтернету речей (IoT). Збір енергії магнітного поля (MFEN) з компонентів, що несуть струм, таких як силові кабелі, є особливо перспективною технологією для застосувань інтелектуальних мереж, інфраструктури та моніторингу навколишнього середовища. У цій статті представлено однокаскадний перетворювач змінного/постійного струму, архітектуру керування та конструкцію збирача енергії, що застосовуються до пристроїв MFEN. Перетворювач потужності складається з повного мосту MOSFET, який використовується для активного випрямлення індукованої напруги на приймачі, забезпечуючи при цьому регульовану вихідну напругу. Цей підхід підходить для широкого спектру ліній електромережі, пропонуючи компактний силовий каскад, який забезпечує зменшення кількості компонентів, тоді як активне випрямлення мінімізує втрати енергії, тим самим покращуючи теплове управління в силовій електроніці порівняно з попередніми дослідженнями. Експериментальні результати показують, що перетворювач потужності забезпечує стабільне джерело енергії та пропонує альтернативу автономним пристроям інтелектуальних мереж IoT.

2.1 Збір енергії магнітного поля (MFEN) з компонентів, що несуть струм

Електроенергетична мережа заохочує перехід до більш стійких джерел енергії та процесів з метою зменшення споживання викопного палива та розширення інтеграції відновлюваних джерел енергії [41]. Електросистема стикається зі значними проблемами, що виникли внаслідок інтеграції розподілених енергетичних ресурсів, електромобілів та накопичувачів енергії, тоді як традиційні теплові електростанції виводяться з експлуатації, що призводить до більш складної енергомережі [42]. Цей новий підхід створює проблеми для розподільчих мереж, які спочатку були розроблені за інших умов, включаючи управління перевантаженнями та підтримку постійного балансу між попитом та пропозицією. Крім того, спостерігається поступове збільшення кількості електронних пристроїв, що використовуються як інвертори, джерела живлення або зарядні пристрої для акумуляторів на основі силової електроніки, що створюють гармонійні

спотворення форм хвиль напруги або струму в результаті властивості технології нелінійності [4, 5]. Крім того, розгортання додаткових розподільчих та передавальних ліній для збільшення потужності вимагатиме додаткових зусиль [6], включаючи частіше технічне обслуговування та більш суворі процедури перевірки для гарантування стійкості мережі [7]. В результаті, зростає інтерес до більш складних методів моніторингу мережі [18] та більш ефективних методів оцінки для забезпечення надійності електричних мереж [10] та підтримки безперервності постачання та якості обслуговування, тим самим зміцнюючи стійкість мережі [43].

Зі зростанням кількості підключених пристроїв Інтернет речей (IoT) стає глобальним явищем, яке трансформує галузь. IoT поступово розвиває величезну мережу взаємопов'язаних пристроїв, які можуть надавати дані через сенсори. Це розширення зумовлене низкою технологічних розробок, включаючи вдосконалені функції підключення, які дозволяють створювати передові комунікаційні мережі, мікропроцесори з наднизьким енергоспоживанням, що забезпечують можливості периферійних обчислень, та розвиток складних алгоритмів на базі штучного інтелекту, які аналізують та обчислюють великі обсяги даних. З іншого боку, периферійні обчислення пропонують рішення, розподіляючи обчислювальне навантаження між різними елементами, підключеними до мережі, що сприяє її масштабованості. Як результат, IoT сприяє новим можливостям для підвищення надійності та ефективності в промисловості та електроенергетичному секторі.

Розгортання пристроїв моніторингу для інтелектуальних мереж у розподільчих або передавальних лініях електропередач вимагає наявності джерела енергії, такого як акумулятори. Однак це часто недоцільно для багатьох застосувань, головним чином через значну кількість пристроїв та складну доступність їх розташування. Тому очевидно, що збір енергії є вирішальним елементом у забезпеченні безперебійної роботи пристроїв інтелектуальних мереж, що не потребують обслуговування. Збір енергії магнітного поля (MFEN) – це технологія, яка дозволяє захоплювати та перетворювати магнітне поле, присутнє навколо ліній електропередач, у форму енергії, яку можна використовувати для живлення пристроїв Інтернету речей. MFEN дозволяє використовувати компоненти електромережі, що несуть змінний струм, такі як повітряні та підземні кабелі живлення, як джерело енергії без необхідності перетворення напруги. Порівняно з альтернативними методами збору енергії, які захоплюють енергію навколишнього середовища, включаючи сонячну, вітрову, теплову, механічні коливання, радіочастотну або електричні поля, отримання енергії з

високою щільністю енергії (MFEN) з силових кабелів не залежить від переривчастого характеру джерела. Крім того, воно має високу щільність енергії, що робить його перспективною технологією для інтелектуальних мереж, яка забезпечує енергію з потоків струму, присутніх у провіднику, неінтрузивним способом.

Споживання енергії пристроєм Інтернету речей може змінюватися залежно від кількох факторів, включаючи кількість і тип сенсорів, частоту оновлення даних, складність алгоритмів обробки, характер передачі та прийому даних, а також активацію функцій енергозбереження. Технологія MFEN являє собою життєздатну альтернативу, яка може служити джерелом енергії, одночасно подовжуючи термін служби сенсорів та зменшуючи час простою на обслуговування та експлуатаційні витрати. Пристрій Інтернету речей на основі технології MFEN зазвичай складається з таких основних компонентів:

- Перетворювач: пристрій, який збирає енергію з магнітних полів, використовуючи феромагнітне осердя, яке концентрує магнітний потік та індукує вторинну котушку від компонента, що несуть змінний струм. Отже, MFEN також називають індуктивним збиранням енергії.
- Перетворювач потужності: силовий електронний каскад, який перетворює індуковану напругу в перетворювачі на придатну для використання електронними пристроями форму електрики.
- Накопичення енергії: Зберігає зібрану енергію для забезпечення регульованого шини постійного струму. Для відокремлення джерела енергії від навантаження можна використовувати суперконденсатор або акумулятор.
- Сенсори та мікроконтролер: для збору даних та управління інформацією. Це включає периферійні обчислення, підключення, зберігання даних та інтерфейси користувача.

У галузі магнітних накопичувачів енергії (MFEN) було проведено широке дослідження, що стосується різних критичних аспектів. У [51] запропоновано пристрій магнітного збору енергії та багатоступеневе джерело живлення на основі випрямляча та вихідної схеми каскаду регулювання напруги. Проте експериментальні результати не представлені. У [52] проаналізовано оптимізацію конструкції пристроїв збору енергії, з особливим акцентом на магнітні пристрої. У [53] запропоновано багатоступеневий перетворювач потужності на основі діодного випрямляча та двох активних MOSFET-контролерів як засіб застосування методу десатурації з метою збільшення збираної енергії. Запропоновано альтернативний підхід, що використовує двоступеневе джерело живлення на основі діодного

випрямляча та понижувального перетворювача. У [54] також представлено високоефективну реалізацію двоступеневого зарядного пристрою для акумуляторів, який використовує активний мостовий випрямляч та синхронний понижувальний перетворювач.

Незважаючи на ці досягнення, сучасний стан техніки переважно спирається на багатоступеневі перетворювачі для управління зібраною енергією. Натомість, одноступеневий перетворювач передбачає зменшення кількості компонентів, що призводить до зниження вартості та розміру пристрою. Крім того, активне випрямлення сприяє мінімізації втрат у силовій електроніці, покращує терморегуляцію та позитивно впливає на ключові фактори. Таким чином, це дослідження має на меті усунути це обмеження, досліджуючи реалізацію багатоступеневого енергогенератора (MFEN), інтегрованого з одноступеневим перетворювачем потужності та стратегією керування. Ключовий внесок цього дослідження включає наступне:

- Розробка однокаскадного перетворювача змінного струму в постійний, призначеного для зменшення втрат компонентів та тепла в силовій електроніці в процесі перетворення енергії;
- Розробка та впровадження архітектури керування для регулювання напруги та активного випрямлення, що покращує продуктивність запропонованого силового каскаду;
- Конструкція системи збору енергії, адаптована для досягнення розширеного та ефективного діапазону.

Для досягнення цих цілей було проаналізовано теоретичну основу з метою детального опису принципу роботи багатоступеневого випрямляча (MFEN), який включає захоплення магнітного поля, що генерується лінією електропередачі, та перетворення його в електричну енергію для живлення електронних пристроїв. Нерегульована індукована змінна напруга з магнітного поля повинна керуватися перетворювачем потужності. Як правило, цей процес включає етап, який випрямляє змінну напругу в змінну постійну напругу, що потім вимагає додаткового етапу регулювання для адаптації до потрібного діапазону. У цій статті пропонується одноступеневий підхід, який інтегрує активне випрямлення та механізм керування для регулювання постійної напруги в межах необхідного робочого діапазону, тим самим усуваючи необхідність у кількох етапах перетворення. Було проведено схемне моделювання для перевірки конструкції та оцінки її продуктивності. Нарешті, запропонований етап потужності був експериментально перевірений у лабораторії з використанням прототипу.

2.2 Принцип дії перетворювача потужності для збору енергії магнітного поля

Перетворення енергії струмопровідних компонентів на електричну енергію (МФЕН) – це метод перетворення енергії, присутньої в магнітному полі, що створюється під час протікання змінного струму через провідник, в електричну енергію. Як показано на рисунку 2.1, він базується на трансформаторі струму, який затискає струмопровідний компонент як лінію живлення та складається з феромагнітного осердя, лінії живлення зі змінним струмом, що утворює первинну обмотку, та вторинної обмотки. Феромагнітне осердя складається з магнітних матеріалів з високою проникністю, які створюють шлях з низьким опором для магнітного поля, щоб індукувати напругу у вторинній обмотці. Параметри N_p та N_s представляють кількість витків у первинній та вторинній обмотках, тоді як D , d та h представляють зовнішній діаметр, внутрішній діаметр та висоту відповідно.

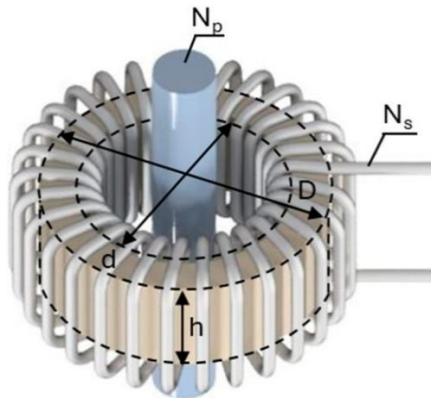


Рисунок 2.1 – Збирач енергії магнітного поля, що складається з феромагнітного осердя та вторинної котушки, розташованих в лінії електропередач

Індукована напруга вторинної обмотки визначається законом електромагнітної індукції Фарадея. Цей закон стверджує, що електрорушійна сила, індукована в замкнутому контурі, прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку через контур. У математичній формі закон Фарадея виражається наступним чином

$$\mathcal{E}(t) = -N_s \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (2.1)$$

де $\mathcal{E}(t)$ позначає індуковану електрорушійну силу, $\Phi(t)$ позначає магнітний потік, а N_s позначає кількість витків на вторинній обмотці. Знак мінус вказує на те, що індукована електрорушійна сила створює напругу, яка протидіє зміні магнітного потоку відповідно до закону Ленца як наслідок закону збереження енергії. Для встановлення індукованої електрорушійної сили необхідно визначити магнітний потік у феромагнітному осерді, що проходить через диференціальну площу (dS), перпендикулярну до напрямку магнітного поля. Це можна розрахувати наступним чином

$$\Phi(t) = \int B(t) \cdot dS. \quad (2.2)$$

Магнітний потік залежить від щільності магнітного потоку $B(t)$, яка визначається магнітною проникністю матеріалу μ залежно від напруженості магнітного поля $H(t)$, що прикладається лінією електропередачі. Цей зв'язок виражається наступним рівнянням

$$B(t) = \mu \cdot H(t). \quad (2.3)$$

Проникність – це міра намагніченості, яка виникає в матеріалі у відповідь на прикладене магнітне поле. Немає простого зв'язку між H та B , оскільки ці матеріали мають нелінійну магнітну поведінку та демонструють значний магнітний гістерезис, тому немає навіть однозначного функціонального зв'язку. Приблизна напруженість магнітного поля $H(t)$ прикладена лінією живлення до феромагнітного осердя, визначається за допомогою ефективної магніторушійної сили $MMF(t)$, виражена в ампер-витках, поділена на ефективну довжину сердечника L_e .

$$H(t) = \frac{MMF(t)}{L_e}. \quad (2.4)$$

Ефективна магніторушійна сила є функцією первинного струму $i_p(t)$ і струм вторинної сторони $i_s(t)$ у котушці з N_s .

$$MMF(t) = i_p(t) - N_s i_s(t). \quad (2.5)$$

У випадку лінії змінного струму первинний струм можна спростити, припустивши синусоїдальну форму хвилі. З іншого боку, вторинний струм

$i_s(t)$ має таку ж частоту, як і первинний струм, тоді як форма хвилі залежить від активного випрямлення та імпедансу навантаження.

$$MMF(t) = I_{p\ max}\sin(\omega t) - N_s i_s(t). \quad (2.6)$$

У випадку тороїда ефективна довжина осердя, яка еквівалентна середній відстані, пройденій лініями магнітного потоку в магнітному колі, визначається наступним виразом

$$L_e = \frac{\pi(D-d)}{\ln \frac{D}{d}}, \quad (2.7)$$

де d – визначає внутрішній радіус D , який стосується зовнішнього радіуса. Тоді приблизна напруженість магнітного поля $H(t)$ для тороїда, встановленого на лінії змінного струму, визначається наступним виразом

$$H(t) = \frac{MMF(t)}{L_e} = \frac{I_{p\ max}\sin(\omega t) - N_s i_s}{\frac{\pi(D-d)}{\ln \frac{D}{d}}}. \quad (2.8)$$

Отже, величина напруги, індукованої в MFEH, визначається величиною первинного струму, імпедансом навантаження, а також властивостями матеріалу та фізичною конструкцією феромагнітного осердя. Оскільки збирач енергії генерує змінну індуковану напругу, необхідний перетворювач потужності для забезпечення стабільної вихідної напруги, ефективного управління зібраною енергією та захисту підключеного електронного пристрою.

2.3 Перетворювач потужності магнітного поля

Частота змінної напруги, що індукується в перетворювачі, залежить від частоти мережі, яка зазвичай у світі становить 50 Гц або 60 Гц. Амплітуда вторинної напруги та струму змінюється залежно від первинного струму та залежить, серед інших параметрів, від феромагнітних властивостей матеріалу осердя, кількості витків у вторинній обмотці та споживаного навантаженням.

Як показано на рисунку 2.2, для випрямлення змінного струму та керування індукованими широкими та змінними напругами пропонується однокаскадний MOSFET H-міст. N-канальний MOSFET міст забезпечує

повнохвильове активне випрямлення з низькими втратами потужності. Така топологія також спрощує теплову конструкцію, усуває потребу в радіаторах та зменшує розмір друкованої плати, збільшуючи щільність потужності. Для зменшення впливу стрибків напруги в схему інтегровано такі два TVS-діоди: один двонаправлений (D_1) для сторони змінного струму та інший однонаправлений (D_2) для шини постійного струму. Керамічний байпасний конденсатор (C_1) поєднаний з великим електrolітичним згладжуючим конденсатором (C_2) для зменшення пульсацій напруги та підвищення стабільності шини постійного струму. Шунтуючі резистори (R_1) та (R_2) використовуються для визначення струму, що протікає через кожен гілку Н-моста, тоді як змінна напруга в МФЕН та напруга в шині постійного струму вимірюються для цілей керування.

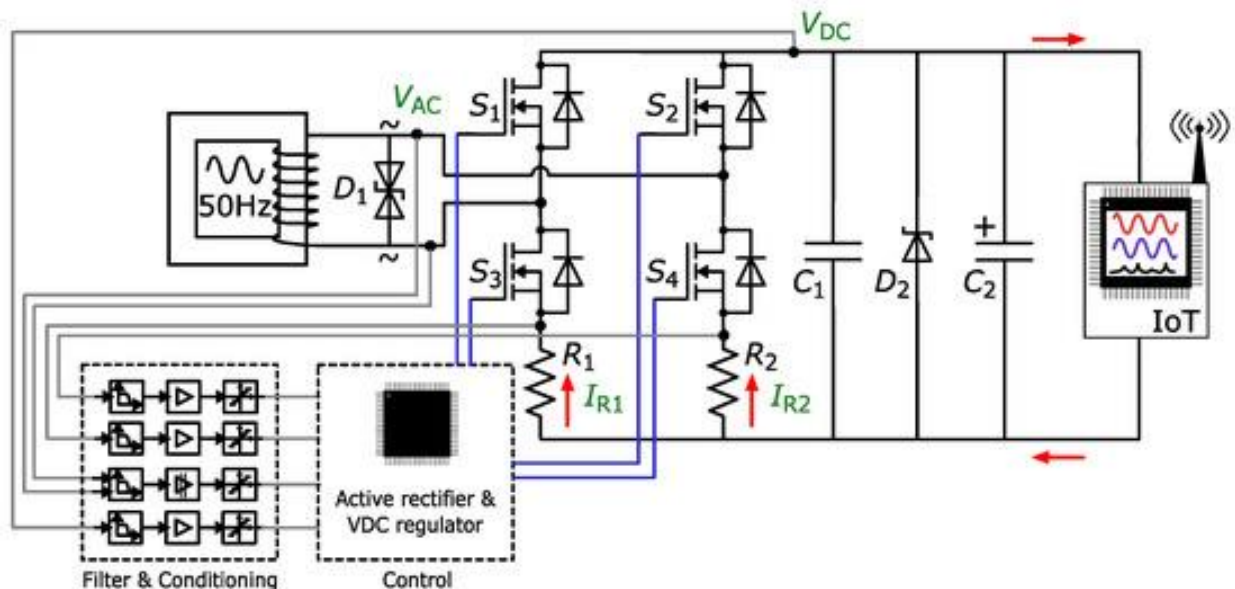


Рисунок 2.2 – Однокаскадний MOSFET-перетворювач Н-подібного мосту з вимірюваннями напруги та струму для контуру керування та діаграма збору енергії магнітного поля

Блок керування керує напругою постійного струму, що діє на чотири перемикачі Н-моста. На рисунку 2.3 зображено високорівневий контролер, який генерує команду ввімкнення/вимкнення для керування активним випрямлячем. Для цього вимірюється напруга постійного струму (V_{DC}) і порівнюється з опорною напругою (V_{DCref}), і сигнал помилки (eV_e). Потім регулятор гістерезису вмикає активний випрямляч, якщо сигнал помилки падає нижче нижньої межі гістерезису, або вимикає його, якщо помилка перевищує верхню межу. Коли керування активним випрямленням вимкнено, як показано на рисунку 2.4, обидва нижні перемикачі (S_3 та S_4) замикаються для короткого замикання

вторинної котушки. Цей механізм зупиняє додатковий збір енергії, регулюючи напругу в шині постійного струму та таким чином запобігаючи виникненню небезпечних рівнів напруги для електронних компонентів. Перемикачі S_3 та S_4 активуються замість S_1 та S_2 для підтримки вимірювання струму шунтуючими сенсорами R_1 та R_2 .

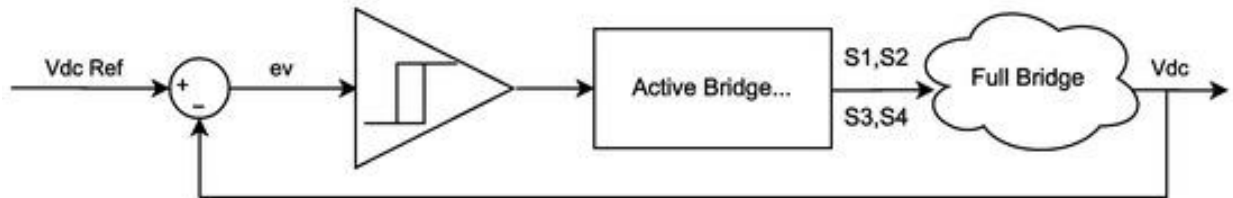


Рисунок 2.3 – Блок-схема схеми керування напругою шини постійного струму в MFEN

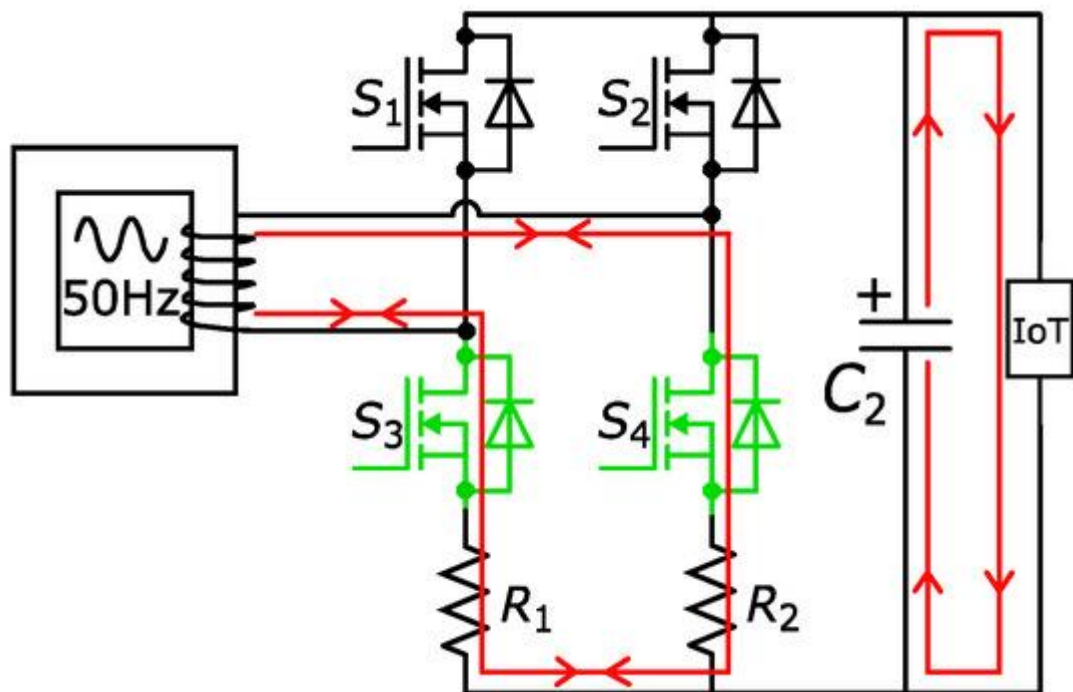


Рисунок 2.4 – Регулятор напруги постійного струму змушує коротке замикання вторинної котушки в накопичувачі енергії, щоб перешкодити подальшому збору енергії та запобігти перенапрузі в шині постійного струму

З іншого боку, коли сигнал помилки падає нижче нижньої межі гістерезису, активне керування випрямлячем вмикається. У цьому випадку всі ключі розмикаються, і IR_1 і IR_2 вимірюються для контролю напрямку струму, залежно від того, чи є півперіод позитивним чи негативним. Якщо IR_1 приймає додатне значення, змінна напруга (V_{ACBAC}) вище, ніж V_{DC} S_2 та S_3 активуються (рис. 2.5a), щоб примусово пропускати струм через канал MOSFET замість діода в корпусі, мінімізуючи втрати потужності.

Навпаки, якщо $IR2$ стає позитивним, тоді $-VAC$ вище, ніж VD $S1$ та $S4$ замкнені (Рисунок 2.5b). Обидва стани закінчуються, коли умова активації стає хибною ($|VAC| < VDC$), виміряна як зміна напрямку в $IR1$ і $IR2$, і всі перемикачі залишаються розімкнутими, доки не буде виконано нову умову активації.

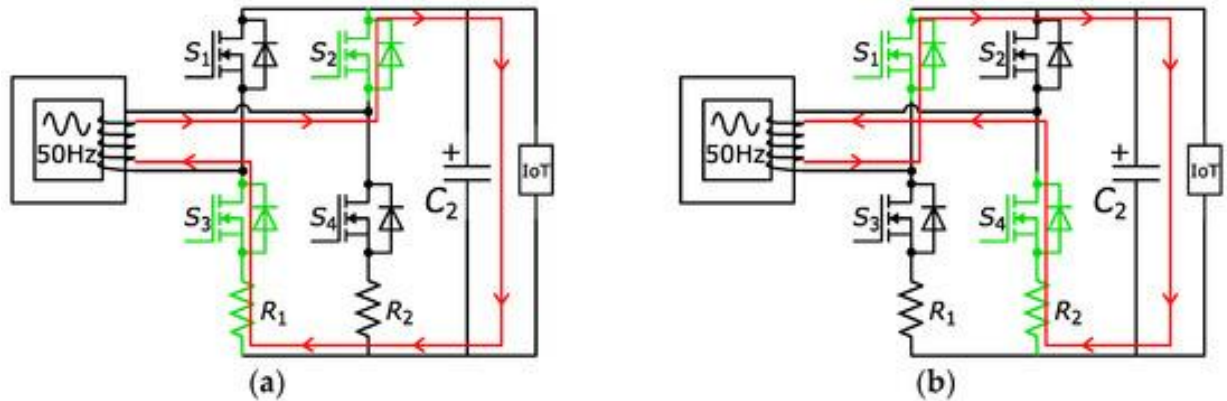


Рисунок 2.5 – Режим активного випрямляча, що працює з відповідними верхнім та нижнім MOSFET-транзисторами в Н-мості для кожного позитивного (а) та негативного (б) напівперіоду активного випрямлення напруги від MFEH

Алгоритм керування реалізовано з частотою контуру 20 кГц, що значно вище робочої частоти активного випрямляча (50–60 Гц). Ця висока частота дозволяє ефективно керувати MOSFET-транзисторами через GPIO. У цьому застосуванні затримка контуру керування 50 мкс є незначною, що забезпечує швидку реакцію та точне регулювання вихідної напруги.

Моделювання силової електроніки

Для перевірки запропонованого силового електронного перетворювача та його архітектури керування було проведено детальне моделювання за допомогою програмного забезпечення для моделювання Simba V 24.11. Модель моделювання включає ключові компоненти системи, включаючи перетворювач, одноступеневий перетворювач та алгоритм керування для активного випрямлення та регулювання напруги, як показано на рисунку 2.6. COMP1 та COMP2 використовуються для керування активним випрямленням шляхом порівняння напруги на шунтуючих резисторах $R1$ та $R2$ з порогами напруги регістрів $C1$ та $C2$ відповідно. COMP3 використовується для регулювання напруги шляхом порівняння вихідної напруги із заданим значенням, визначеним регістром $C3$. Щоб врахувати затримку контуру керування 50 мкс, після кожного компаратора вбудовані

блоки затримки. Основною метою моделювання є оцінка продуктивності системи як у початкових перехідних, так і в усталених умовах.

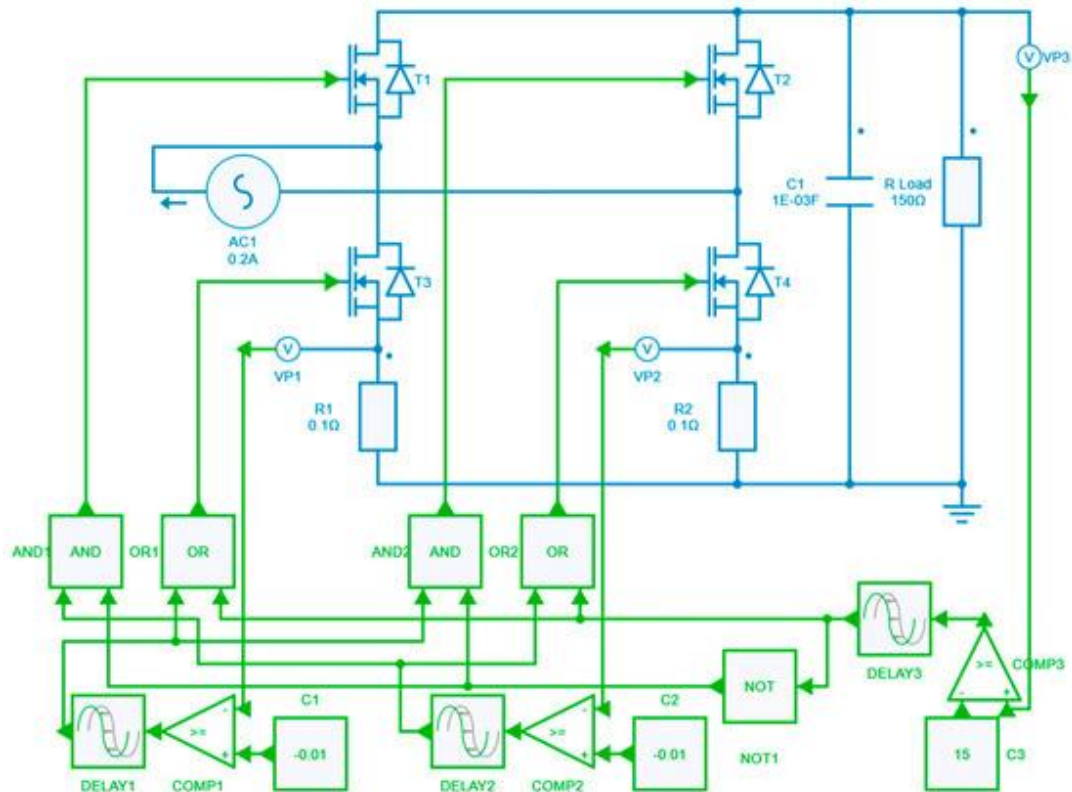


Рисунок 2.6 – Схема моделювання перетворювача потужності та архітектури керування

На рисунку 2.7 представлено результати моделювання початкової перехідної характеристики запропонованої силової електронної схеми та архітектури керування. Під час цієї фази алгоритм керування спочатку виконує активне випрямлення для заряджання конденсатора шини постійного струму. Після досягнення цільового заданого значення напруги регулятор напруги стабілізує вихідну напругу. Швидка реакція системи гарантує, що вихідна напруга залишається в потрібному діапазоні, навіть за динамічних коливань зібраної енергії.

Стаціонарний режим роботи системи детально зображено на рисунку 2.8, де демонструється стабільна вихідна напруга 15 В на шині постійного струму з мінімальними пульсаціями. Моделювання демонструє ефективність механізму короткого замикання у запобіганні перенапрузі. У періоди збору надлишкової енергії контур керування активує перетворювач короткого замикання, забезпечуючи, щоб напруга шини постійного струму залишалася в безпечних межах. Ці результати підтверджують, що запропонована конструкція задовольняє експлуатаційні вимоги до пристроїв інтелектуальної мережі Інтернету речей з автономним живленням, забезпечуючи стабільну, ефективну та надійну роботу.

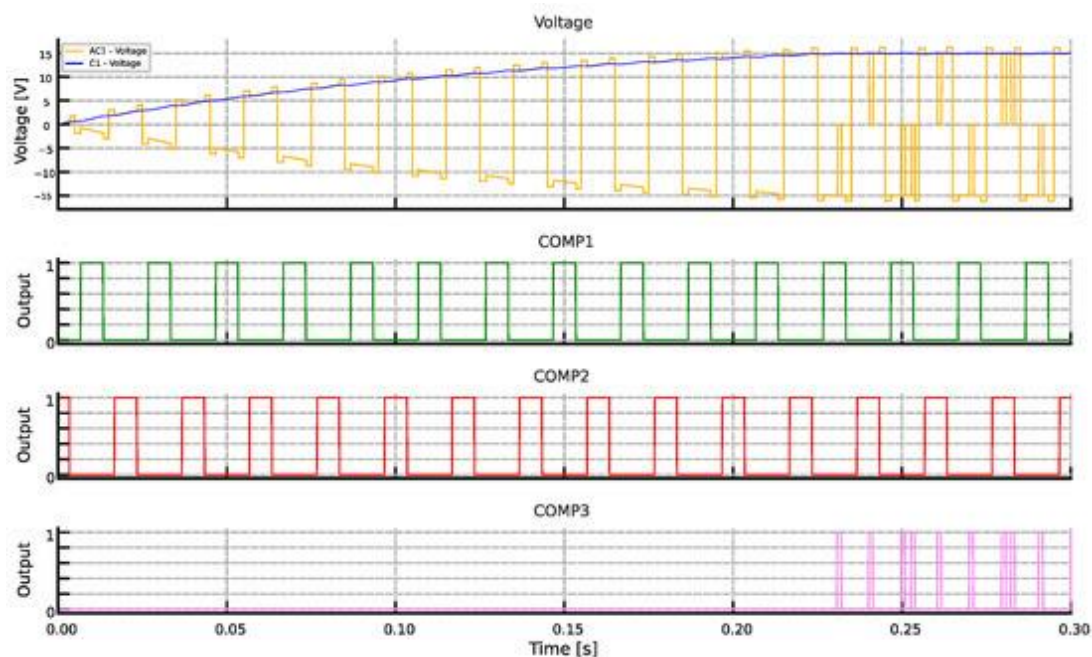


Рисунок 2.7 – Результати моделювання початкового перехідного процесу індукованої напруги на перетворювачі MFEN (жовтий), напруги шини постійного струму (синій) та сигналів перемикання компараторів MOSFET (зелений, червоний та фіолетовий, активні при 1)

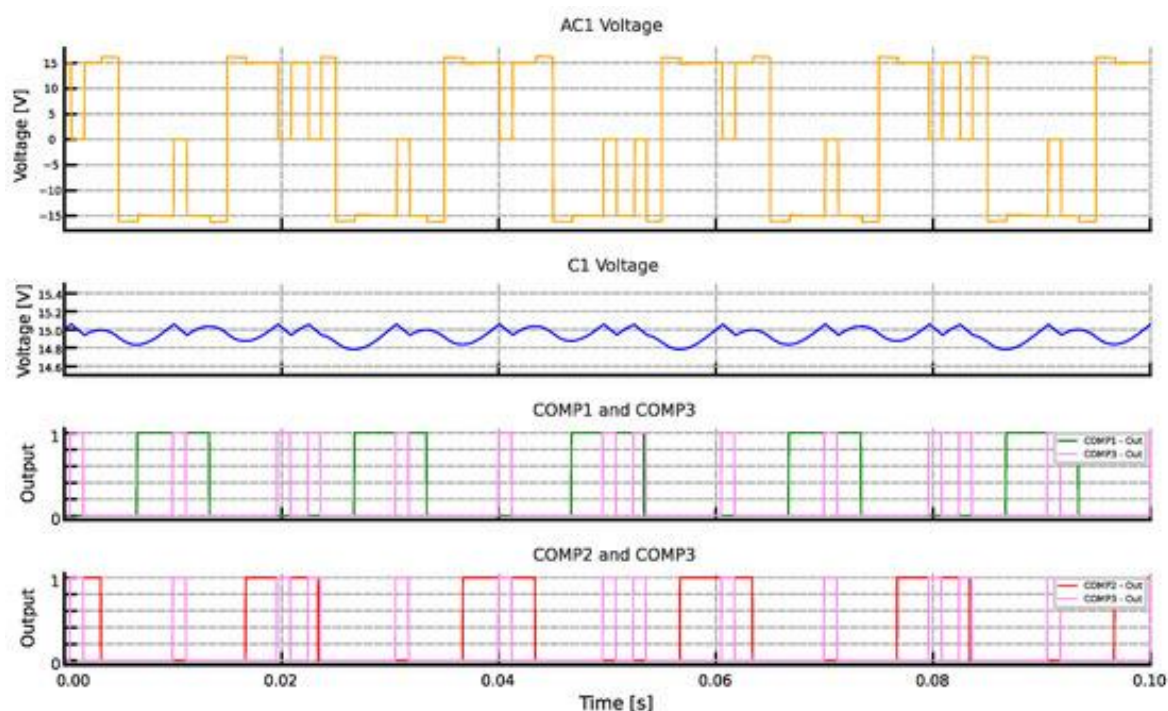


Рисунок 2.8 – Результати моделювання для стаціонарного стану індукованої напруги на перетворювачі MFEN (жовтий), пульсації напруги шини постійного струму (синій) та сигналів перемикання компараторів MOSFET (зелений, червоний та фіолетовий, активні при 1)

2.4 Збір енергії магнітного поля

Конструкція перетворювача MFEN вимагає ретельного врахування його електричних характеристик для забезпечення сумісності з силовим каскадом. Ключові елементи, такі як феромагнітний сердечник та обмотка, повинні бути оптимізовані для досягнення відповідного діапазону вихідної напруги та адекватної подачі потужності в усьому спектрі коливань струму мережі живлення. Метою є розробка конструкції ефективного та надійного збирача енергії. Це буде досягнуто шляхом оптимізації ключових параметрів, що визначають перетворювач MFEN, таких як матеріал, геометрія та кількість витків. Ці параметри будуть базуватися на попередніх дослідженнях [46], щоб гарантувати, що збирач відповідає вимогам цільового застосування.

Діапазон струмів у лініях електропередач може суттєво відрізнятись залежно від цільового застосування. У цій роботі ми розглядали максимальний струм 600 А та цільове споживання потужності 1,5 Вт для навантаження, яке може працювати з мінімум 10% від максимального струму (60 А) в лінії електропередач. Феромагнітний тороїд, виготовлений з кремнієвої сталі, був обраний завдяки його високій проникності та економічній ефективності. Для зменшення вихрових струмів було використано ламінований сердечник з кремнієвої сталі. У таблиці 2.1 наведено конструктивні обмеження та технічні характеристики перетворювача MFEN. Розміри були обрані для розміщення на лініях електропередач великого діаметра, забезпечуючи при цьому достатню здатність до збору енергії для живлення навантаження за мінімальних заданих умов.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики збору енергії магнітного поля та характеристики лінії електропередач

Power line (N1)	Value	Unit
current range	0–600	A (ac)
frequency	50	Hz
Ferromagnetic core	Value	Unit
weight	178	g
outer diameter (D)	57	mm
inner diameter (d)	41	mm
height (h)	15.6	mm
material	grain oriented silicon steel	
Secondary coil (N2)	Value	Unit
turns	360	
material	tinned copper	
area	0.26	mm ²

Зв'язок між вихідною напругою та струмом змінюється шляхом вибору кількості витків вторинної котушки. Вторинна котушка була намотана 360 витками, щоб досягти бажаної напруги 15 В постійного струму після етапу випрямлення в точці максимальної потужності (МРР) з мінімальним первинним струмом 60 А.

2.5 Моделювання магнітного поля перетворювача MFEN

Для перевірки запропонованого підходу до перетворювача MFEN було проведено моделювання магнітного поля за допомогою програмного забезпечення для моделювання FEMM версії 4.2. Модель моделювання включає феромагнітне осердя, а також первинну та вторинну котушки, що точно відображає фізичні характеристики системи. Роботу системи було змодельовано у трьох важливих робочих точках, що представляють різні умови, для оцінки її ефективності та надійності за різних сценаріїв.

- Струм короткого замикання: Вихідний струм короткого замикання визначається як такий, що виникає, коли вихідні клемами замикаються, в результаті чого на виході виникає нульова напруга, а вторинний струм дорівнює первинному струму, поділеному на кількість витків у вторинній обмотці. У цьому випадку зустрічне магнітне поле, індуковане у вторинній обмотці, є максимальним, як показано на рисунку 2.9а. Отже, ефективне магнітне поле у феромагнітному осерді є незначним, оскільки магнітне поле, що генерується лінією живлення, компенсується магнітним полем, індукованим у вторинній обмотці.
- Напруга холостого ходу: Напруга холостого ходу генерується, коли вторинні котушки не підключені до жодного навантаження, що призводить до максимальної індукованої напруги без протікання струму у вторинній обмотці. У цей момент магнітне поле, що не протидіє первинній обмотці, у вторинній обмотці немає, що підтверджує, що обрана геометрія здатна ефективно спрямовувати магнітне поле, досягаючи рівня насичення 1,6 Тл, як це можна спостерігати на рисунку 2.9b.
- Точка максимальної потужності: МРР визначається як точка, в якій співвідношення між індукованою напругою та вторинним струмом є максимальним, що призводить до максимально можливої вихідної потужності для визначеного струму в первинних котушках.

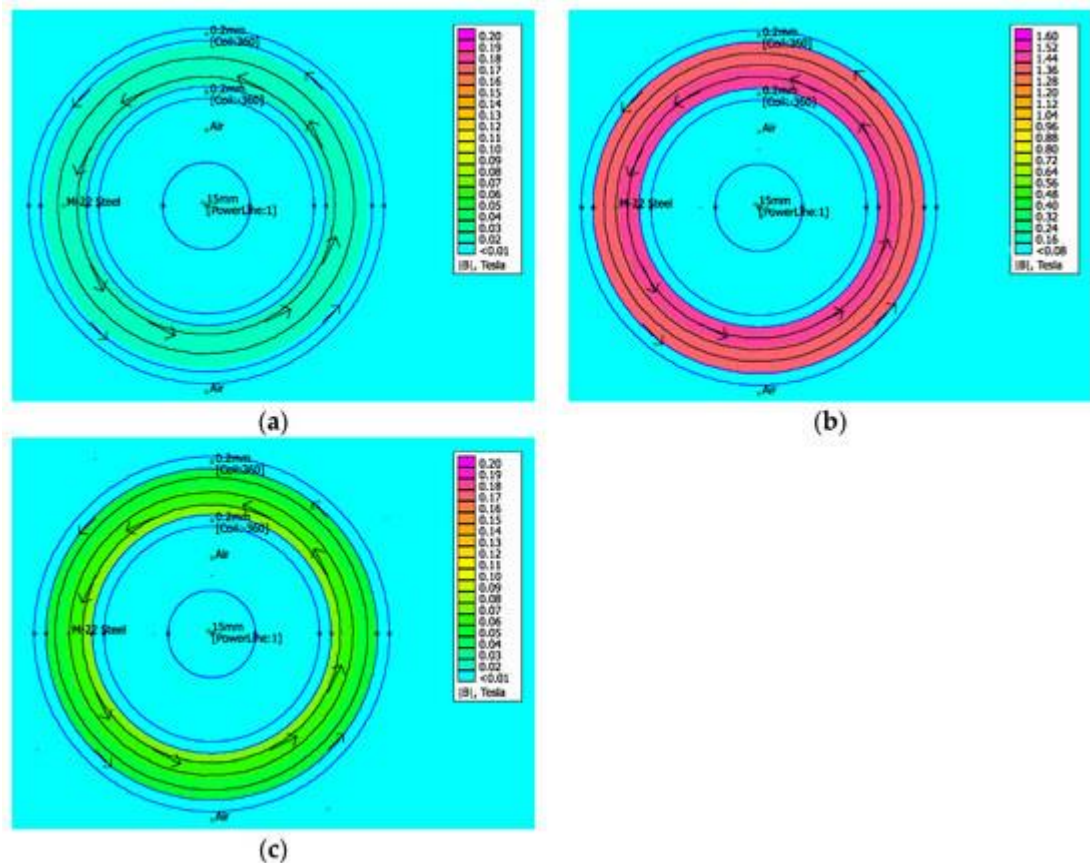


Рисунок 2.9 – Моделювання магнітного поля методом скінченних елементів для перетворювача MFEN з лінією живлення 60 А: (а) з короткозамкненою вторинною обмоткою; (б) з розімкнутою вторинною обмоткою; (с) у точці максимальної потужності

2.6 Прототип MFEN

Електрична поведінка прототипу MFEN залежно від первинного струму показана на рисунку 2.10, який базується на таблиці 2.2. Як показано на рисунку 2.10a, коли первинний струм становить 60 А, при подачі на навантаження постійного струму 15 В можна зібрати понад 1,5 Вт. Зі збільшенням первинного струму можна зібрати все більше енергії для цільової напруги, забезпечуючи належну роботу з навантаженням 1,5 Вт. Характеристика MFEN показує прямий зв'язок між максимальною потужністю (МРР) та первинним струмом. Цей зв'язок продемонстровано на рисунку 2.10b за допомогою рівняння лінійної регресії з коефіцієнтом детермінації (R^2), близьким до одиниці, що вказує на те, що точки даних тісно збігаються з лінією тренду. Ця кореляція спостерігається в діапазоні струмів лінії електропередач від 30 до 600 А. Навпаки, потенційна енергія, яка може бути зібрана при первинному струмі менше 30 А, є незначною. Слід зазначити, що MFEN здатний працювати при первинних струмах нижчих за

60 А, досягаючи 15 В на шині постійного струму. Однак цього не забезпечує достатньо енергії для безперервної роботи при потужності 1,5 Вт.

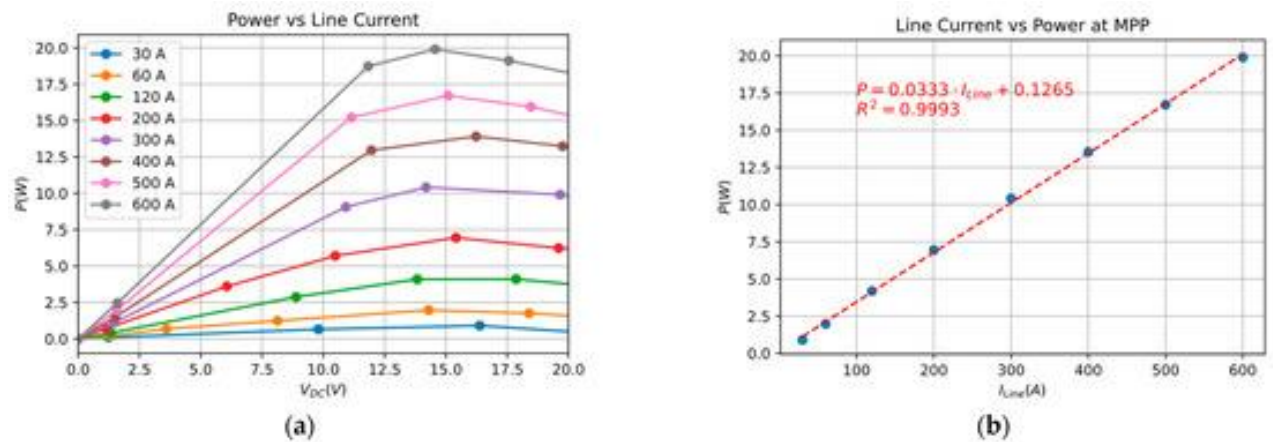


Рисунок 2.10 – Потужність, що збирається MFЕН з частотою 50 Гц та первинними струмами 0–600 А: (а) для різних напруг постійного струму; та (б) за струмів точки максимальної потужності

Таблиця 2.2 - Потужність, що збирається перетворювачем MFЕН, та напруга на шині постійного струму після каскаду випрямлення з кількома струмами первинної лінії та різними навантаженнями. Виміряно за допомогою діодного випрямляча та програмованого електронного навантаження постійного струму

Primary Current (A)			MPP					
30	W	0.000	0.095	0.669	0.653	0.906	0.776	0.457
	V	0.000	1.247	8.500	9.800	16.380	17.500	20.400
60	W	0.000	0.190	0.677	1.240	1.980	1.752	1.530
	V	0.000	1.307	3.600	8.130	14.300	18.390	20.550
120	W	0.000	0.401	2.875	4.094	4.190	3.632	2.804
	V	0.000	1.337	8.890	13.830	17.860	20.850	23.590
200	W	0.000	0.700	3.608	5.700	6.948	6.234	6.096
	V	0.000	1.141	6.070	10.490	15.410	19.600	21.790
300	W	0.000	1.108	9.060	10.208	10.420	9.906	8.900
	V	0.000	1.465	10.920	12.890	14.190	19.660	22.820
400	W	0.000	1.500	12.960	13.409	13.540	13.240	12.340
	V	0.000	1.514	11.960	13.010	16.230	19.760	22.200
500	W	0.000	1.990	15.210	16.310	16.714	15.952	14.400
	V	0.000	1.585	11.140	13.260	15.090	18.470	22.560
600	W	0.000	2.456	18.730	18.923	19.892	19.120	17.950
	V	0.000	1.599	11.830	13.000	14.560	17.570	20.980

На рисунку 2.11 показано специфічну криву ВН, отриману з феромагнітного осердя, обраного для цієї пропозиції. Ця крива визначається двома важливими параметрами: проникністю, яка кількісно визначає легкість, з якою матеріал намагнічується під впливом зовнішнього

магнітного поля; та густиною магнітного потоку насичення (B_{sat}), яка представляє максимальну величину магнітного потоку, що призводить до повної орієнтації магнітних доменів.

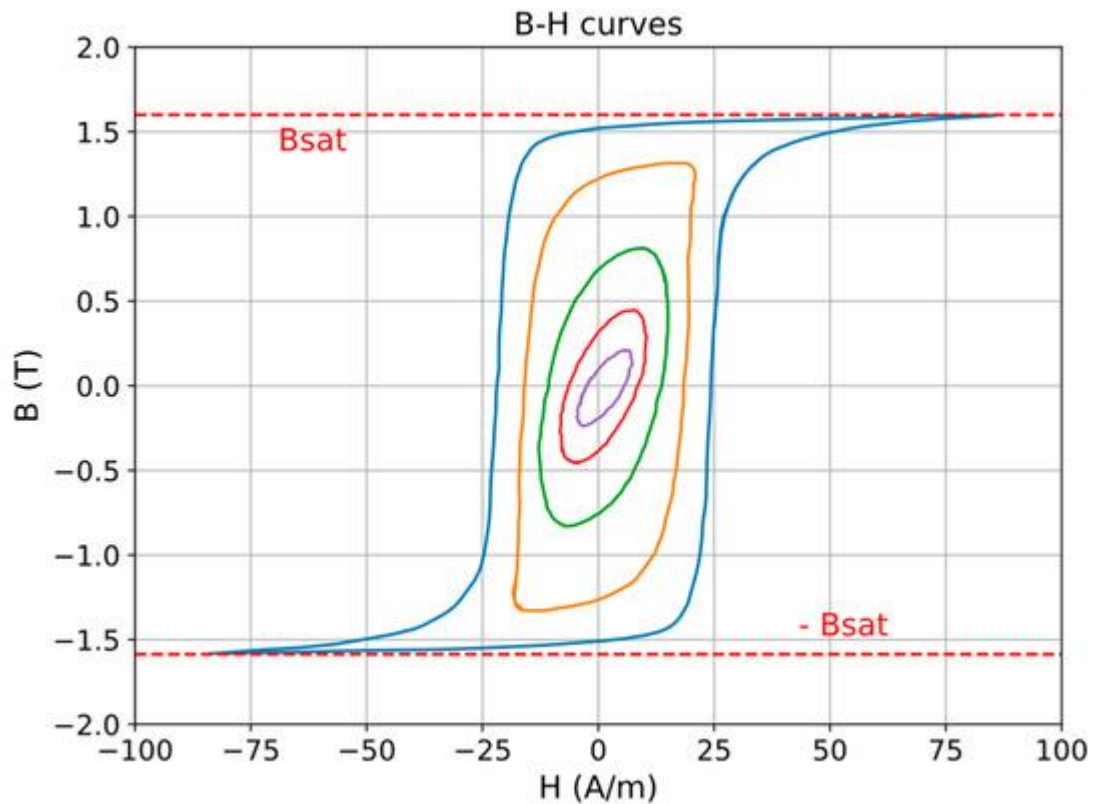


Рисунок 2.11 – Сімейство петель ВН (петель гістерезису) та граничних областей, виміряних при 50 Гц, для тороїдального зразка, вибраного з електротехнічної сталі з орієнтованою зернистістю

Для реалізації та тестування запропонованого підходу контур керування та збір даних були запрограмовані на опорній платі на базі мікроконтролера STM32G4. Компоненти силової електроніки та формування сигналу, пов'язані з повним мостом, були реалізовані за допомогою плати розширення на базі N-канальних MOSFET (STL220N6F7), які були модифіковані для задоволення вимог роботи на частоті 50–60 Гц та забезпечення вимірювань струму та напруги в заданому діапазоні для цього застосування.

Відповідно до заданих конструктивних параметрів, максимально допустимий струм у лінії живлення становить 600 А, тоді як коефіцієнт витків перетворювача в котушці обмежує струм до 1,67 А на перетворювачі потужності. Низька частота комутації та м'яке перемикання під час увімкнення незначно впливають на втрати потужності, тим самим підвищуючи енергоефективність. Обрані MOSFET-транзистори мають типовий опір R_{on} 1,4 мОм. У найгіршому випадку, коли Н-подібний міст

постійно заморочує перетворювач, втрати потужності зосереджуються на двох нижніх MOSFET-транзисторах, кожен з яких має втрати 3,89 мВт. Ця енергія може бути легко розсієна на друкованій платі завдяки цим втратам, що становлять 0,5% від номінальної потужності.

На рисунку 2.12 зображено прототип, встановлений на випробувальному стенді, який обладнаний для імітації середовища мережі електропередач. У первинній обмотці генерується змінне магнітне поле частотою 50 Гц, аналогічне європейській лінії електропередач. Це магнітне поле керується вручну автотрансформатором для регулювання напруги в інжекторі струму. Прототип збирача енергії підключений до перетворювача потужності, який керується алгоритмом керування, закодованим у мікроконтролері. Перетворювач збирає енергію з магнітного поля, а каскад живлення випрямляє індуковану змінну напругу, перетворюючи її на фіксовану постійну напругу 15 В. Нарешті, для контролю споживання енергії додається налаштоване електронне навантаження.

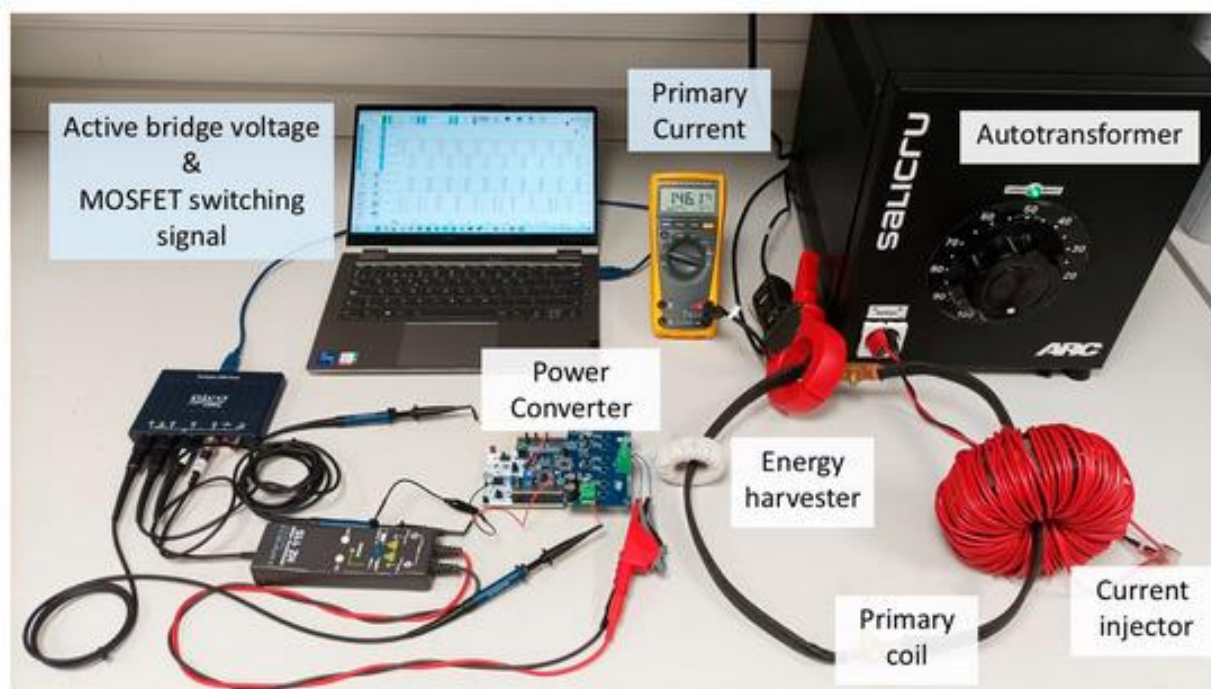


Рисунок 2.12 – Лабораторний випробувальний стенд, оснащений MFEN, що складається з перетворювача та однокаскадного перетворювача змінного/постійного струму, підключеного до емуляваної лінії живлення

Для визначення функціональності та характеристик однокаскадного перетворювача змінного/постійного струму із запропонованим збирачем енергії було проведено серію випробувань. Для оцінки функціональності контролювалися індуковане напруження на перетворювачі, вихідна напруга шини постійного струму, пульсації та сигнали керування перемиканням

MOSFET. Взявши максимальний струм лінії, що розглядається, рівним 600 А, та фіксоване навантаження 1,5 Вт на стороні постійного струму, було проведено такі важливі випробування:

- Первинний струм становить 5% від максимального струму мережі живлення (30 А).
- Первинний струм становить 10% від максимального струму мережі живлення (60 А).
- Первинний струм становить 50% від максимального струму мережі живлення (300 А).
- Первинний струм – це максимальний струм мережі живлення (600 А).

Під час першого випробування первинний струм становить 5% від максимального струму мережі живлення, що еквівалентно 30 А. Як показано на рисунку 2.13, напруга, що досягається на шині постійного струму в цій конкретній точці, становить близько 10 В, оскільки зібраної потужності недостатньо для досягнення 15 В та безперервного забезпечення навантаження потужністю 1,5 Вт.

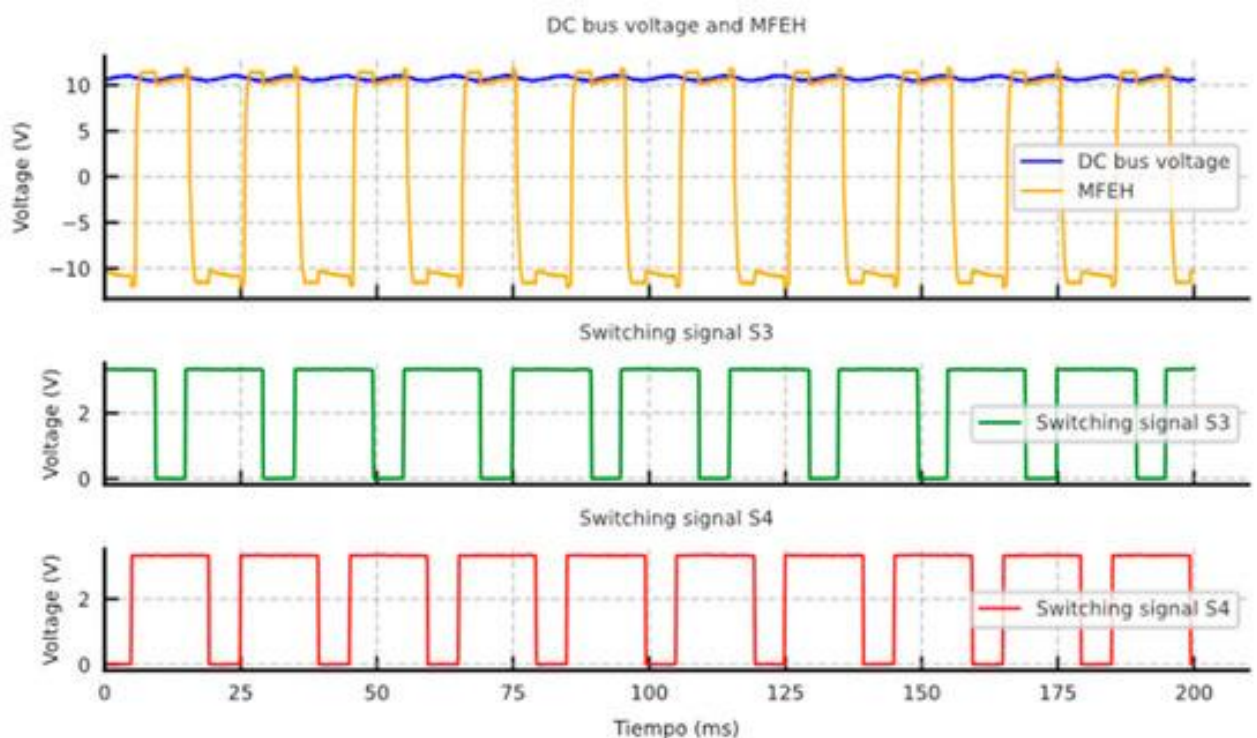


Рисунок 2.13 – Лабораторні вимірювання індукованої напруги на перетворювачі МФЕН (жовтий), напруги шини постійного струму (синій) та сигналів перемикання MOSFET нижніх MOSFET (червоний та зелений, активні при 0 В), що емулюють струм 5% від максимального струму мережі живлення (30 А)

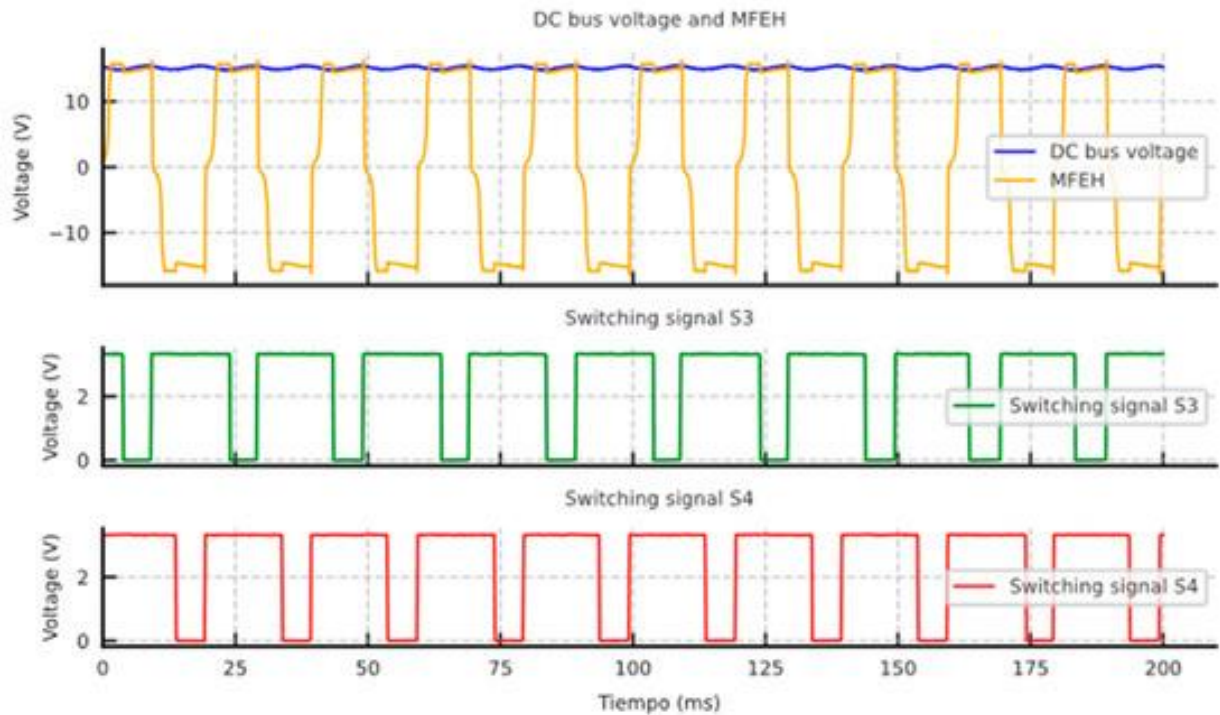


Рисунок 2.14 – Лабораторні вимірювання індукованої напруги на перетворювачі MFEH (жовтий), напруги шини постійного струму (синій) та сигналів перемикання MOSFET нижніх MOSFET (червоний та зелений, активні при 0 В), що емулюють струм 10% від максимального струму мережі живлення (60 А)

Друге випробування проводиться, коли напруга шини постійного струму стабілізується на рівні 15 В, що спостерігається при струмі первинної обмотки приблизно 60 А, що еквівалентно 10% від максимального струму мережі живлення. За цих умов енергія, що отримується з лінії живлення, дорівнює споживаній потужності, що дозволяє безперервно подавати навантаження потужністю 1,5 Вт. Як показано на рисунку 2.14, шина постійного струму підтримує стабільний вихідний сигнал 15 В з мінімальними пульсаціями, що демонструє стабільність системи.

У третьому випробуванні первинний струм визначається як 50% від максимального струму мережі живлення, що еквівалентно 300 А. У сценаріях, коли зібрана потужність перевищує потребу навантаження, регулятор напруги шини постійного струму відіграє вирішальну роль у запобіганні перенапрузі, керуючи коротким замиканням перетворювача. Як показано на рисунку 2.15, протягом кожного напівперіоду індукованої змінним струмом напруги згладжувальний конденсатор на шині постійного струму досягає верхньої межі напруги в межах контуру гістерезису керування. У цей момент до перетворювача застосовується коротке замикання шляхом активації обох нижніх MOSFET-транзисторів. Як тільки

конденсатор розряджається до нижньої межі напруги через споживання навантаженням, коротке замикання розряджається, відновлюючи нормальну роботу. Цей механізм забезпечує надійне регулювання напруги та захищає систему від перенапруги.

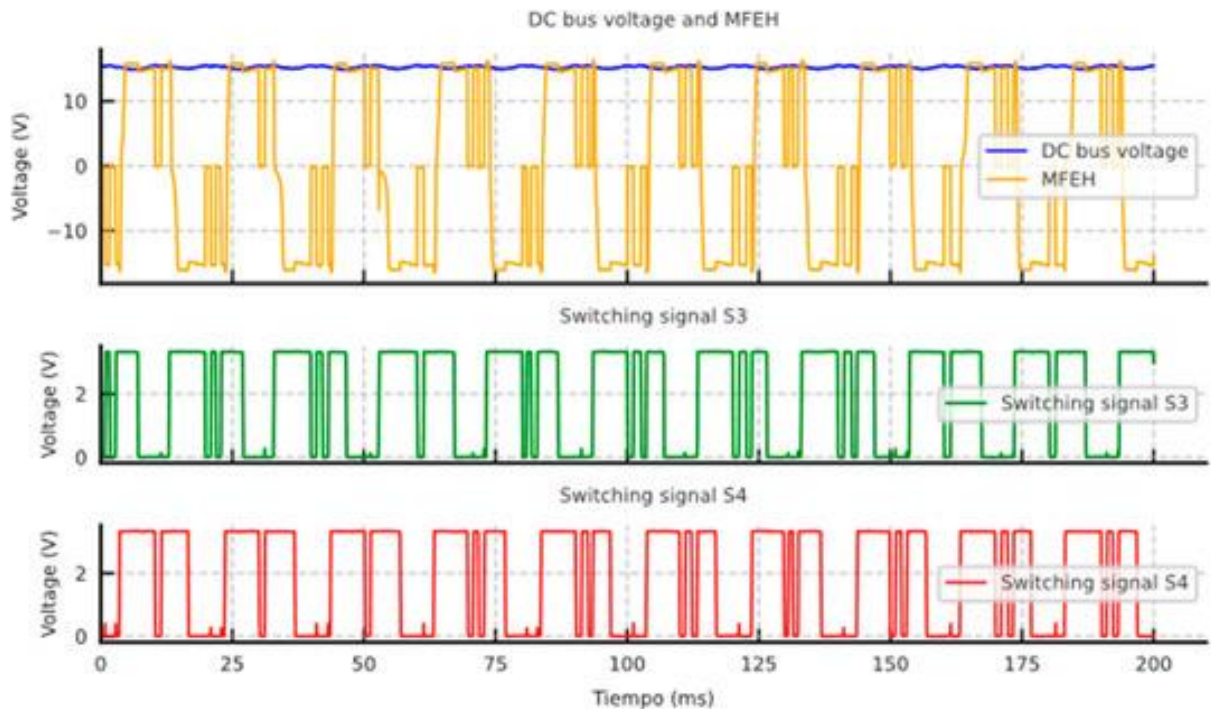


Рисунок 2.15 – Лабораторні вимірювання індукованої напруги на перетворювачі MFEH (жовтий), напруги шини постійного струму (синій) та сигналів перемикання MOSFET нижніх MOSFET (червоний та зелений, активні при 0 В), що емулюють струм 50% від максимального струму мережі живлення (300 А)

Фінальне випробування проводиться при максимальному струмі мережі живлення 600 А. При цьому струмі зібрана потужність досягає свого максимального надлишку, значно перевищуючи вимоги до навантаження. В результаті, регулятор напруги постійного струму бере на себе керування коротким замиканням перетворювача. У цьому сценарії конденсатор шини постійного струму заряджається швидше через збільшення вихідної потужності перетворювача. Спостерігається, що протягом більшої частини періоду, протягом якого на MFEH індукується змінна напруга, регулятор напруги постійного струму активно закорачує перетворювач. Ця поведінка зображена на рисунку 2.16, що підкреслює роль регулятора у підтримці стабільності системи за цих умов.

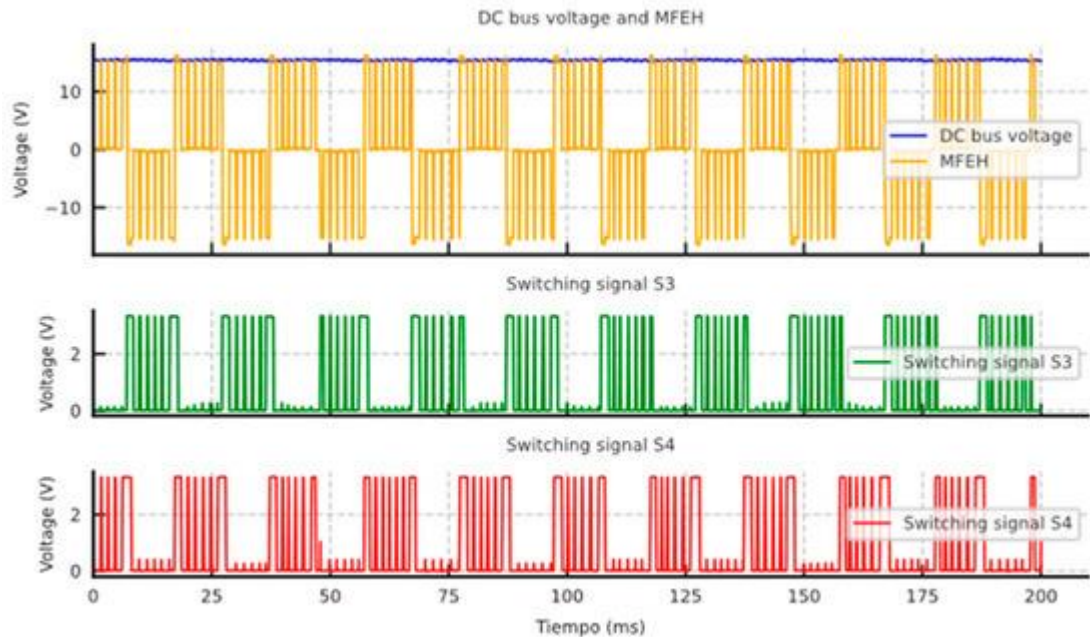


Рисунок 2.16 – Лабораторні вимірювання індукованої напруги на перетворювачі MFEH (жовтий), напруги шини постійного струму (синій) та сигналів перемикання MOSFET нижніх MOSFET (червоний та зелений, активні при 0 В), що емулюють максимальний струм мережі живлення (600 А)

Спектральна чистота вихідного сигналу в кожному тесті становить приблизно 99,99%, з домінуючою частотою 0 Гц та незначною складовою 100 Гц та кратними їй, що пояснюється випрямленням частоти мережі. Це вказує на те, що більша частина енергії сигналу зосереджена на постійній складовій.

У цьому розділі представлено однокаскадний перетворювач змінного/постійного струму та архітектуру керування, розроблені для неінтрузивного багатоканального енергогенератора (MFEH). Цей перетворювач потужності складається з повномостового MOSFET-каскаду, який забезпечує активне випрямлення, одночасно регулюючи вихідну напругу. Збір енергії базується на трансформаторі струму, який використовує компоненти змінного струму для підтримки роботи пристроїв Інтернету речей з автономним живленням від інтелектуальної мережі.

Це дослідження пропонує новий підхід, який сприяє розробці компактних енергетичних збирачів, придатних для автономного живлення пристроїв інтелектуальних мереж Інтернету речей. Ключовий внесок цього дослідження включає розробку одноступеневого електронного перетворювача змінного струму в постійний, призначеного для зменшення втрат компонентів у процесі перетворення енергії. Крім того, запропоновано розробку та реалізацію архітектури керування для регулювання напруги та

активного випрямлення, що покращує продуктивність запропонованого силового каскаду, а також розробку системи збору енергії, адаптованої для досягнення розширеного та ефективного діапазону.

Для подальшого підтвердження переваг запропонованого однокаскадного перетворювача потужності, у таблиці 2.3 наведено порівняння між цією конструкцією та існуючими топологіями багатокаскадних перетворювачів, що обговорюються в сучасному рівні техніки. Це порівняння підкреслює відмінності в кількості каскадів та кількості компонентів у багатокаскадних конструкціях, які зазвичай вимагають окремих каскадів випрямлення та регулювання, що зазвичай призводить до більшої складності та нижчої щільності енергії при перетворенні потужності. Запропонований однокаскадний підхід інтегрує активне випрямлення, яке мінімізує втрати енергії, тим самим покращуючи тепловий режим у силовій електроніці та регулювання напруги в компактному силовому каскаді. З іншого боку, на відміну від пристроїв з живленням від батарей, запропоноване рішення вимагає мінімального струму в лінії для живлення навантаження.

Таблиця 2.3 - Порівняльне зіставлення кількості каскадів, напівпровідникових та пасивних елементів у запропонованому однокаскадному перетворювачі та існуючих багатокаскадних конструкціях.

Topology	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Power Elec.	Additional
2 stages	rectifier	V regulator		unknow	unknow
cascaded cores	clampable core	ungapped core	diode bridge	6 mosfet + 4 diodes	core
2 stages + control	diode bridge	DC/DC	control coil + mosfet	unknow	unknow
2 stages	diode bridge	buck converter		5 diodes + 1 mosfet	inductance
wireless power	AC/DC	DC/AC	AC/DC	unknow	unknow
2 stages	active rectifier	synch. buck		6 mosfet	inductance
2 stages	diode bridge	DC/DC		unknow	unknow
single-stage	active bridge			4 mosfet	

2.7 Висновки до розділу

Результати цього дослідження показують, що технологія MFEN є ефективним методом живлення сенсорів Інтернету речей для інтеграції в інтелектуальні мережі, що забезпечує альтернативу використанню звичайних батарей. Потрібні подальші дослідження для інтеграції MFEN та сигової електроніки в польовий пристрій. Крім того, необхідна довгострокова демонстрація в реальних умовах, щоб отримати більше інформації про потенційні непередбачені ситуації, що впливають на електричну інфраструктуру. До них належать перевантаження по струму, неочікувані

відключення, удари блискавки, екстремальні температури та висока вологість. Інші проблеми, які необхідно вирішити, включають інтеграцію з існуючою інфраструктурою для забезпечення сумісності, проектування з урахуванням електромагнітних перешкод та гармонійних спотворень, а також забезпечення легкого розгортання у віддалених місцях. Нарешті, необхідно провести аналіз витрат і вигод для масштабованості та довгострокової довговічності. Ці сценарії допоможуть оцінити стійкість та надійність запропонованої системи в різних умовах експлуатації. Незважаючи на незначний вплив одного пристрою на додатковий імпеданс та гармоніки через перемикання перетворювача в лінії електропередач, необхідні подальші дослідження для оцінки впливу MFEN на масштабне розгортання цих технологій.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ RFID-СЕНСОР З ІНТЕГРОВАНИМ ЗБОРОМ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОГО ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Лінії передачі постійного струму високої напруги (HVdc) привертають все більше уваги як невід'ємна частина сучасних мереж енергосистеми. Моніторинг постійного струму є важливим для вимірювання та розробки схем динамічного керування характеристиками лінії. Однак це складне завдання, і існує потреба в методах бездротового зондування з високою точністю та динамічним діапазоном. Традиційні методи вимагають прямого контакту з високовольтними провідниками та використовують громіздке та складне обладнання.

3.1 Сенсор на основі надвисокочастотної (UHF) радіочастотної ідентифікації (RFID) для моніторингу постійного струму лінії передачі

У цьому розділі представлено сенсор на основі надвисокочастотної (UHF) радіочастотної ідентифікації (RFID) для моніторингу постійного струму лінії передачі HVdc. Сенсор складається з пасивної RFID-мітки зі спеціально розробленою антеною, інтегрованої з пристроєм магнітного поля на ефекті Холла та блоком збору радіочастотної потужності. Постійний струм вимірюється шляхом моніторингу постійного магнітного поля навколо провідника за допомогою пристрою на ефекті Холла. Внутрішня пам'ять RFID-мітки закодована даними магнітного поля. Весь RFID-сенсор може бути бездротово живитися та опитуватися за допомогою звичайного RFID-зчитувача. Перевагою цього підходу є те, що сенсор не потребує батарейок і додаткового обслуговування протягом терміну служби. Це важлива особливість у високовольтному середовищі, де будь-яке обслуговування вимагає або відключення, або спеціального обладнання. У цьому розділі представлено детальний проект RFID-сенсора, включаючи проектування та вимірювання антени як для RFID-мітки, так і для секції збору радіочастотної потужності, проектування та тестування інтерфейсу мікроконтролера, калібрування сенсора магнітного поля та секцію збору радіочастотної потужності. Сенсор магнітного поля на основі UHF RFID був виготовлений та випробуваний за допомогою лабораторної експериментальної установки. В експерименті для проведення випробувань постійного струму для виготовленого сенсора використовувався алюмінієвий провідник діаметром 40 мм, який зазвичай використовується в лініях передачі високої напруги постійного струму 500 кВ, що передають постійний струм до 1200 А. Сенсор

був розміщений поблизу провідника таким чином, щоб пристрій на ефекті Холла був близько до поверхні провідника, а показання отримував RFID-зчитувач. Чутливість усього RFID-сенсора становила 30 мВ/мТл з лінійною поведінкою в діапазоні щільності магнітного потоку від 0 мТл до 4.54.5 мТл.

Повітряні лінії електропередачі високої напруги постійного струму (HVdc) привертають все більше уваги як невід'ємна частина сучасних мереж енергосистем. Моніторинг магнітного поля важливий для безконтактних вимірювань струму та впровадження схем динамічного керування номінальною напругою лінії. Щоб уникнути прямого електричного підключення до мережі лінії електропередачі, дослідники та промислові підприємства використовують магнітне поле, що генерується лінією, для визначення сили струму [41]. Трансформатор постійного струму (DCCT) є найточнішим сенсором вимірювання постійного струму високого струму, який є комерційно доступним [42]. Однак калібрування та встановлення DCCT є складним та комплексним процесом [43].

Сенсори магнітного поля також широко використовуються для моніторингу багатьох різних параметрів повітряних ліній електропередачі високої напруги постійного струму (HVDC), таких як вимірювання струму, вимірювання напруги [44], провисання, галопування [45] та виявлення місць несправностей [46]. Вимірювання магнітного поля може виконуватися з використанням різних підходів до моніторингу повітряних ліній електропередачі HVDC. Однак методи, що вимагають безпосереднього контакту з провідником HVDC, є складними, і необхідне дослідження методів бездротового/дистанційного зондування з високою точністю та широким динамічним діапазоном.

Технологія радіочастотної ідентифікації (RFID) є перспективним та добре розробленим методом бездротового зв'язку [11]. Багато пасивних RFID-пристроїв мають доступну користувачеві пам'ять, яка може бути використана для зберігання інформації сенсора, а також ідентифікатора мітки. Оскільки потужність, необхідна комерційному пасивному RFID-пристрою для реагування на RFID-зчитувач, досить низька, він може працювати на відстані кількох метрів. Коли сенсор вбудований у мітку, потрібна додаткова потужність, і до RFID-сенсора можна додати ректенну, яка збирає радіочастотну енергію від зчитувача [12]. Інтегрований RFID-сенсор, який називається RFID-міткою з власним живленням для автономних обчислень та повсюдного зондування (SPARTACUS), був представлений у [14]. SPARTACUS має відстань зв'язку 3 м та програмовану пам'ять, оптимізовану для RFID-зчитування. Сенсор забезпечує двонаправлений зв'язок зі зчитувачем. Багато сенсорів на основі RFID здатні вимірювати

відстань до цілі за рівнем відбитої потужності. Ця характеристика є спільною для багатьох RFID-сенсорів [43]. Мережі мультиRFID-сенсорів застосовувалися до різних вимірюваних величин, таких як вологість [44] та оцінка якості харчових продуктів [45]. У деяких RFID-сенсорах вимірювана величина модулює силу сигналу, що приймається RFID-міткою [46]. Однак цей підхід добре працює лише в ситуаціях, які не потребують кількісного вимірювання з високою роздільною здатністю.

RFID-сенсори стають популярними в енергетичних системах завдяки своїй здатності пропонувати бездротові, безконтактні вимірювальні рішення. Використання RFID зменшує потребу в складній провідці та обслуговуванні в середовищах високої напруги. У [47] RFID-сенсори використовуються для моніторингу вібрації силового трансформатора та діагностики стану трансформатора. Мітка RFID-сенсора використовує індуктивний збирач енергії через з'єднання з навколишнім змінним магнітним полем трансформатора для живлення тривісного акселерометра, який використовується для бездротового збору 3D-сигналів вібрації з різних місць всередині силового трансформатора для визначення місця несправності. Безчіпові RFID-сенсори були розроблені для виявлення часткових розрядів. Зазвичай, частинний розряд (ЧР) випромінює електромагнітну енергію в діапазоні УВЧ (від 300 до 3000 МГц). Дослідники досліджували можливість захоплення випромінюваної електромагнітної енергії за допомогою антен. Коли відбувається подія ЧР, ЧР індукуює напругу в сенсорній котушці, яка зміщує діод Шотткі. Це призводить до зміни імпедансу RFID-мітки та, як наслідок, до зміни відгуку зворотного розсіювання [47]. У [48] для вимірювання змінного в часі електричного поля в системі опалення, вентиляції та кондиціонування повітря використовується безчіповий RFID-сенсор. Зі зростанням потреби в моніторингу в режимі реального часу та прогнозованому обслуговуванні, RFID-сенсори можуть відігравати ключову роль у підвищенні надійності та продуктивності сучасних енергетичних систем. У таблиці 3.1 наведено приклади бездротових сенсорів, що застосовуються для моніторингу повітряних ліній електропередачі.

Використання RFID-сенсора з живленням для вимірювання магнітного поля повітряної лінії електропередачі постійного струму було продемонстровано авторами цієї статті в попередній публікації [38]. У цій роботі було представлено доказ концепції використання технології RFID у поєднанні з сенсором Холла для бездротового вимірювання постійного магнітного поля. У [49] система не була безбатарейною, а сенсор Холла та мікроконтролер постійно живилися від окремого зовнішнього джерела живлення. У цій статті представлено проектування та виготовлення

безбатарейного RFID-сенсора магнітного поля. Весь RFID-сенсор (включаючи мікроконтролер та сенсор Холла) живиться бездротовим способом від енергії, отриманої від RFID-зчитувача. Сенсор забезпечує простоту експлуатації та пропонує бездротове, ефективне рішення для вимірювання магнітного поля на провідниках лінії електропередачі високої напруги постійного струму.

Таблиця 3.1 - Бездротові сенсори для моніторингу повітряних ліній електропередачі.

Parameter	Type of Line	Type of Sensor	Power Source
Magnetic field	AC and DC	MEMS	Solar energy
Current and sag	AC	Hall effect sensor	Rogowski coil
Current	AC	Multiple sensor	Electromechanical harvester
Vibration	AC and DC	Accelerometer	Solar energy
Vibration	AC and DC	Accelerometer	Battery
Magnetic field	DC	Hall effect sensor	RFID reader

Як показано на рисунку 3.1, сенсор складається з UHF RFID-мітки, інтегрованої з сенсором Холла, який кодує пам'ять мітки вимірним магнітним полем і згодом використовується для модуляції зворотно розсіяного сигналу. Розроблений сенсор оснащений двома антенами: однією для ідентифікації та однією для збору енергії. Один і той самий зчитувач використовується як для живлення RFID-сенсора, так і для зчитування даних вимірювання магнітного поля, закодованих у модульованому зворотно розсіяному сигналі. Було виготовлено та протестовано прототип на одній друкованій платі, який містив усі компоненти, включаючи антену RFID-мітки та антену збирача енергії.

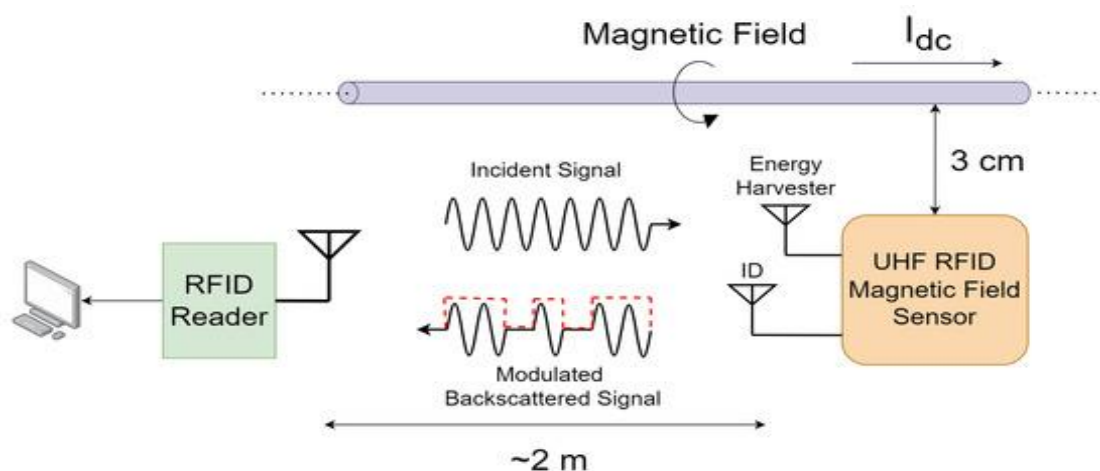


Рисунок 3.1 – Схема сенсорної мітки на основі UHF RFID для вимірювання магнітного поля повітряної лінії передачі постійного струму високої напруги

3.2 Проектування RFID-систем

На рисунку 3.2а показано блок-схему розробленого сенсора. Він складається з лінійно поляризованої антени, узгодженої з RFID-чіпом, мікроконтролера, сенсора магнітного поля та радіочастотного збирача потужності з власною антеною. Прототип сенсора, розробленого на одній друкованій платі (PCB), показано на рисунку 3.2b. Така інтегрована конфігурація забезпечує ефективний зв'язок, обробку даних та вимірювання магнітного поля в рамках компактної, планарної конструкції. Збирач потужності - це інтегральна схема, яка використовується для захоплення енергії, що випромінюється RFID-зчитувачем. Зібрана енергія перетворюється на стабільний вихідний постійний струм і зберігається в суперконденсаторі. Вбудована схема керування живленням контролює живлення як сенсора магнітного поля, так і мікроконтролера та запобігає надмірному споживанню енергії. Для вимірювання постійного магнітного поля використовується сенсор Холла. Коли присутнє магнітне поле, сенсор Холла генерує аналоговий сигнал напруги, який подається на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) мікроконтролера. Цифрові дані відображають силу та напрямок вимірюваного магнітного поля. У цій конструкції мікроконтролер налаштовано як головний пристрій послідовного периферійного інтерфейсу (SPI), а RFID-чіп налаштовано як ведений пристрій SPI.

Мікроконтролер записує інформацію про цифрове магнітне поле в пам'ять EPC RFID-чіпа через SPI. Пам'ять EPC — це пам'ять з можливістю запису всередині RFID-чіпа, де дані можуть зберігатися, витягуватися та зчитуватися RFID-зчитувачем. UHF RFID-сенсор може працювати на максимальній відстані 2 м від RFID-зчитувача. Сенсор Холла в цій конструкції може вимірювати щільність потоку магнітного поля до 20 мТл, що вище, ніж типове постійне магнітне поле поблизу провідників типових ліній електропередачі постійного струму високої напруги. Для вимірювання більших магнітних полів можна використовувати інший сенсор магнітного поля.

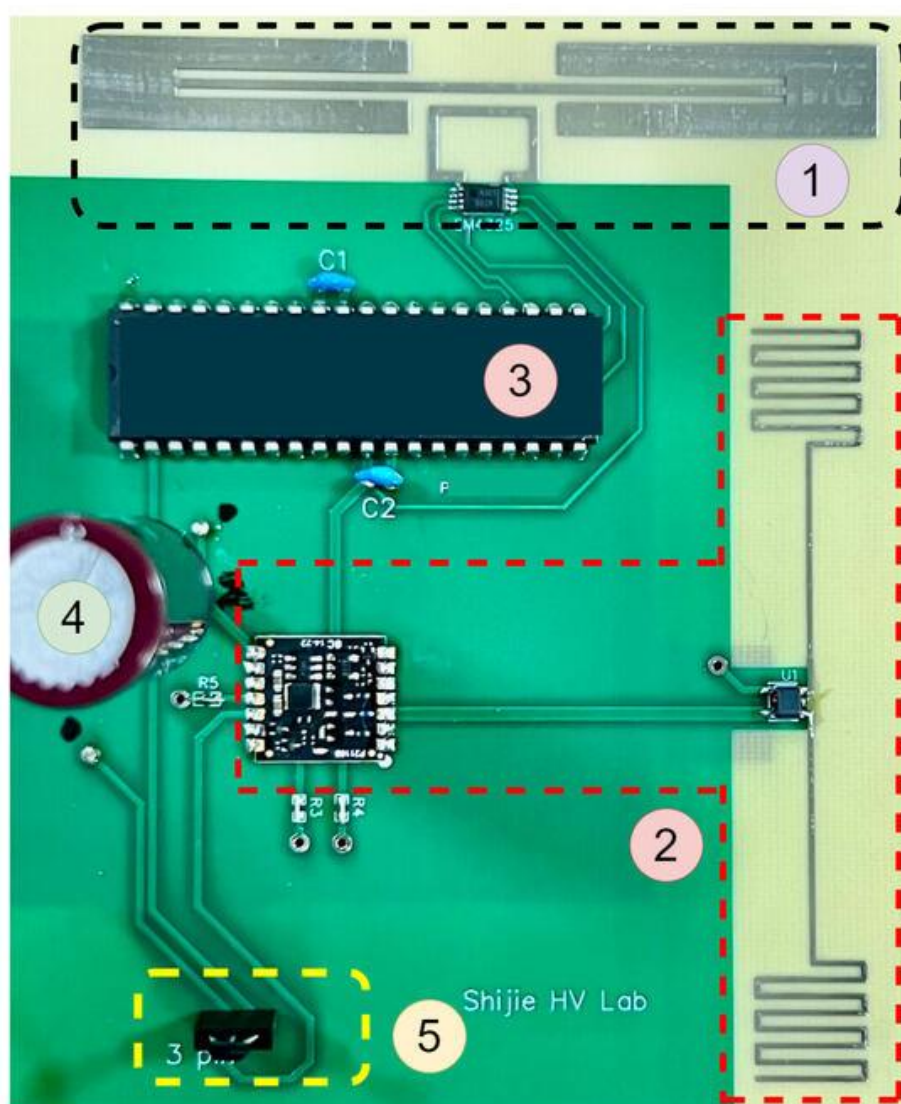
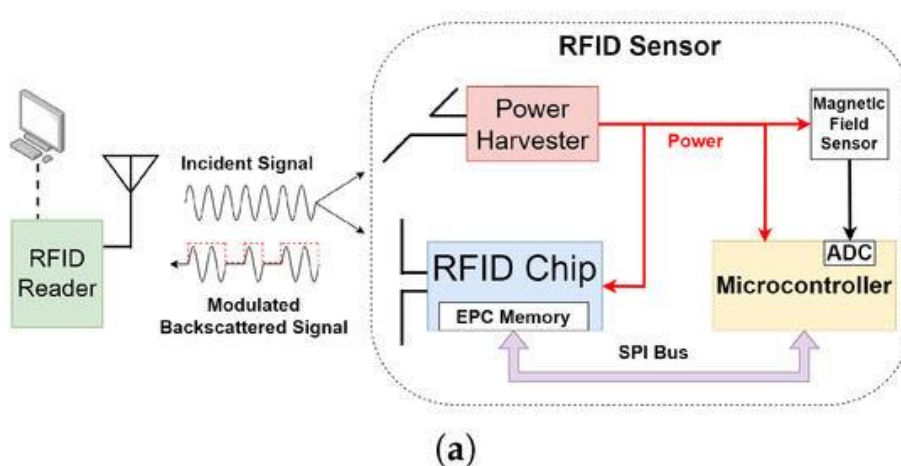


Рисунок 3.2 – (а) Блок-схема мітки сенсора магнітного поля на основі UHF RFID. (б) Вигляд зверху виготовленого сенсора, що складається з (1) пасивного RFID-чіпа та його антени, (2) збирача потужності та його антени, (3) мікроконтролера, (4) суперконденсатора та (5) сенсора Холла

3.3 Проектування та вимірювання антени

Антенa UHF RFID-мітки

Ключовим компонентом у розробці ефективного RFID-сенсора є його антена. Добре підібрана конструкція антени оптимізує як дальність зчитування, так і ефективність зв'язку мітки сенсора. RFID-чіп, що використовується в цій роботі, EM4325, має вхідний імпеданс $Z_{\text{RFIC}} = 7,6 - j 114 \text{ Ом}$ $Z_{\text{RFIC}} = 7,6 - j 114 \text{ Ом}$ на частоті 915 МГц [48]. Як відповідний вибір для узгодження використовується копланарна смужкова антена (CPS) [50], показана на рисунку 3.3. Конструкція CPS антени базується на чвертьхвильовому дипольному антені, навантаженому двома копланарними смужковими лініями. Замість прямого з'єднання використовується невелика петля для підключення CPS антени до RFID-чіпа. Петля, разом з CPS антенною, дозволяє регулювати уявну частину імпедансу антени, одночасно зменшуючи резистивну частину.

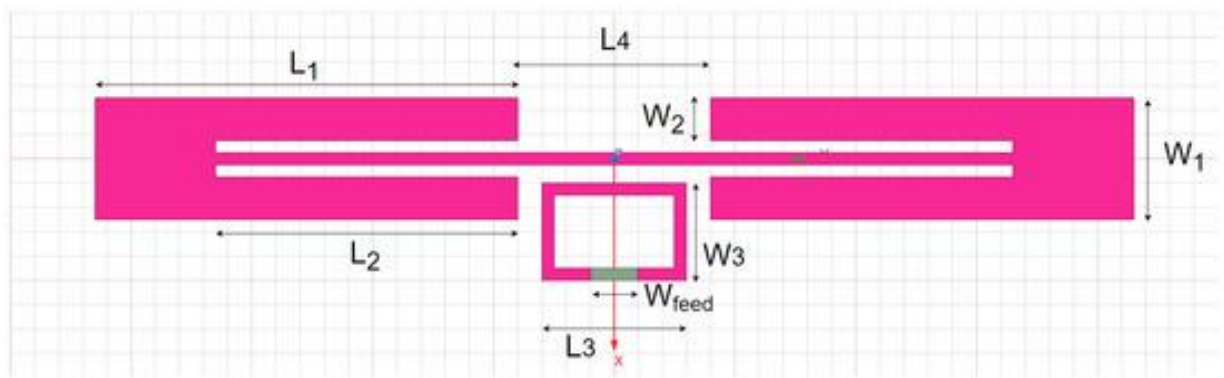
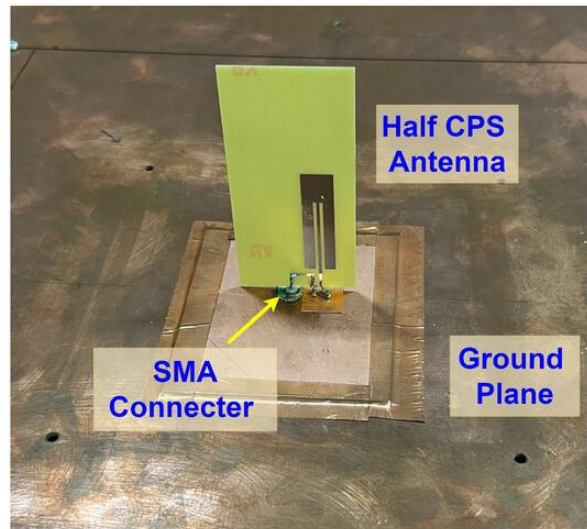


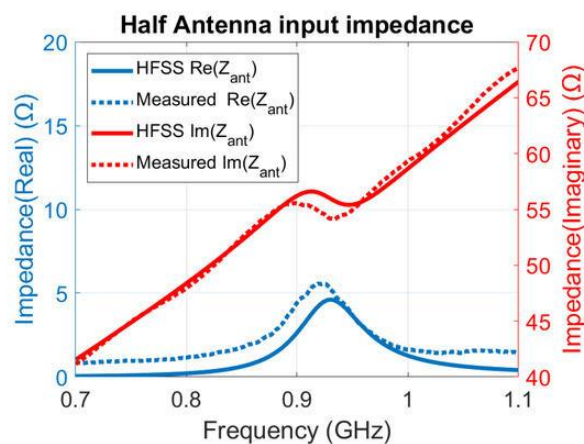
Рисунок 3.3 – Копланарна антена UHF RFID ($L_1 L_1 = 35 \text{ мм}$, $L_2 L_2 = 25 \text{ мм}$, $L_3 L_3 = 12 \text{ мм}$, $L_4 L_4 = 16 \text{ мм}$, $W_1 B_1 = 10 \text{ мм}$, $W_2 B_2 = 3 \text{ мм}$, $W_3 B_3 = 8 \text{ мм}$, $W_{\text{годувати}} B_{\text{годувати}} = 4 \text{ мм}$, зазор = 1.51.5 мм)

За допомогою ANSYS HFSS було розроблено та змодельовано RFID-антену з вхідним імпедансом $Z_{\text{RF}} - \text{Моделювання} = 7,8 + j 113 \text{ Ом}$ $Z_{\text{RF}} - \text{Моделюваний} = 7,8 + j 113 \text{ Ом}$ на частоті 915 МГц. Антена була розроблена для підкладки FR4 товщиною 0,60,6 мм, відносна діелектрична проникність 4.44.4, а тангенс кута втрат 0,02. Після виготовлення було виміряно вхідний імпеданс антени. Оскільки антена CPS є збалансованою антенною, для вимірювання її вхідного імпедансу було використано метод вимірювання половинної антени. На рисунку 3.4а показано установку вимірювання, де половина антени CPS розташована над площиною заземлення, яка значно більша за розмір антени. Порт живлення половинної антени припаяний до роз'єму SMA та підключений до векторного аналізатора мережі (VNA) для вимірювання її вхідного імпедансу. Виміряні дійсна та уявна частини

вхідного імпедансу антени CPS у діапазоні частот від 700 МГц до 1.11 ГГц показано на рисунку 3.4b. Показаний імпеданс відповідає половині антени, що становить половину повного імпедансу антени. На робочій частоті 915 МГц вимірний вхідний імпеданс повної антени становить $Z_{PC} - \text{Вимірний} = 10,8 + j 110 \Omega$ ЗРФ-Виміряно $= 10,8 + j 110 \Omega$.



(a)



(b)

Рисунок 3.4 – (а) Випробувальна установка для напівантени. (б) Вимірний та змодельований вхідний імпеданс антени напівантени CPS для RFID-мітки.

Резонансна частота антени CPS становить 915 МГц

Антенa збирача енергії

Збір енергії RFID-сенсора використовує дипольну антену з меандровою лінією (див. Рисунок 3.5) для збору радіочастотної енергії, що випромінюється RFID-зчитувачем. Щоб уникнути перешкод, вона розміщена ортогонально до RFID-антени. Схема збору енергії P2110B має 50Ω вхідний опір. Щоб зменшити розмір антени, до кінців дипольної антени додається секція меандрової лінії. Антена розроблена

таким чином, щоб мати вхідний опір з уявною частиною, близькою до нуля, та дійсною частиною, меншою за 50 Ом.

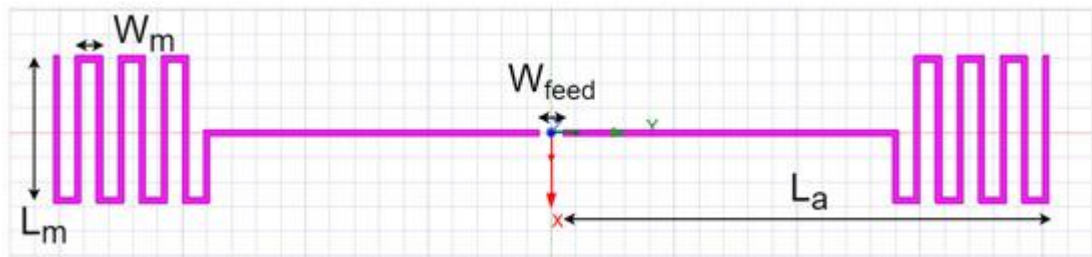
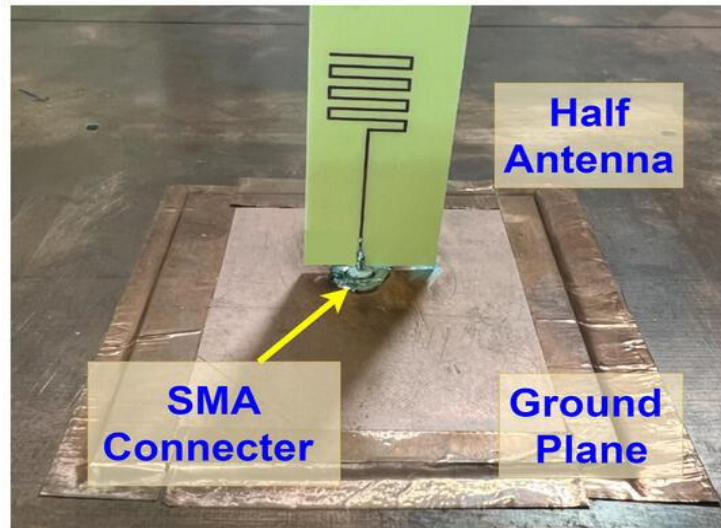


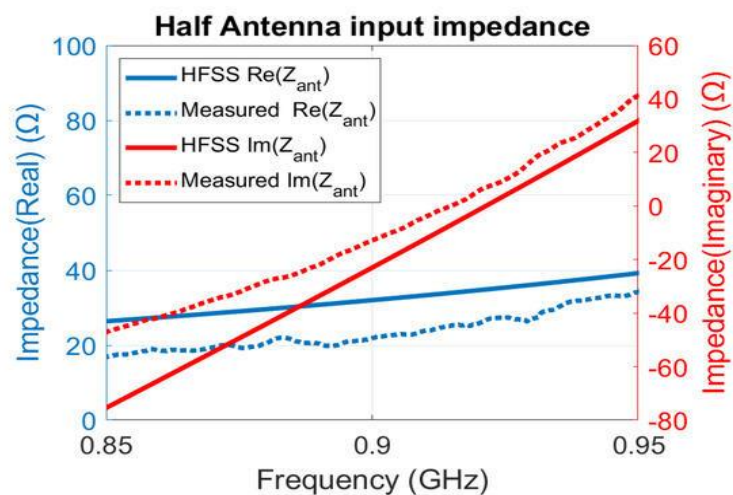
Рисунок 3.5 – Дипольна антена меандрової лінії комбайна ($L_a=39,5$ мм, $L_m=12$ мм, $W_m=2.25$ мм, $W=2$ мм)

Змодельований вхідний імпеданс антени-харвестера, розрахований за допомогою ANSYS HFSS, становить $Z_{EH} = 34,9 + j 0,1 \text{ Ом}$ на частоті 915 МГц. Антена-харвестер була виготовлена на тій самій платі FR4, що й антена RFID. Оскільки антена-харвестер потужності також є збалансованою антеною, для вимірювання її вхідного імпедансу було використано той самий метод половинної антени, як показано на рисунку 3.6 а. Виміряні дійсна та уявна частини антени-харвестера половинної потужності в діапазоні частот від 850 МГц до 950 МГц показано на рисунку 3.6 б. На робочій частоті 915 МГц виміряний вхідний імпеданс антени-харвестера повної потужності становить $Z_{EH} = 26,7 + j 7,0 \text{ Ом}$. Щоб відповідати збалансованому 26,7 Ом вхідний опір антени збирача до 50 Ом вхідний імпеданс збирача потужності, балун 1:1 (ETC1-1-13TR) з внесеними втратами близько 2 dB і використовується лінія передачі чвертьхвильової довжини, як показано на рисунку 3.2а. Довжина та хвильовий опір лінії розраховані на 47 мм та 36 Ом відповідно, на частоті 915 МГц.

Важливим параметром для антени-харвестера є коефіцієнт підсилення антени. Для дипольної антени з меандровою лінією коефіцієнт підсилення буде нижчим, ніж для дипольної антени з півхвильовою довжиною хвилі. Для визначення підсилення антени-харвестера було проведено вимірювання відносного коефіцієнта підсилення антени. В експериментальній установці використана 2.5 дБ-антена Yagi як передавач та комерційна антена з коефіцієнтом підсилення антени 0,5 dBi як опорна антена. Коефіцієнт підсилення антени-харвестера визначається шляхом заміни опорної антени на антену типу меандрової лінії та вимірювання різниці в параметрах передачі за допомогою векторного аналізатора нуклеотидів (VNA). Розроблена антена типу меандрової лінії має коефіцієнт підсилення $\approx 1 \text{ dBi}$ на робочій частоті 915 МГц.



(a)



(b)

Рисунок 3.6 – (а) Випробувальна установка напівантени. (б) Виміряний та змодельований вхідний імпеданс напівдипольної антени меандрової лінії для збирача потужності

3.4 Вимірювання магнітного поля та передача даних

У цьому розділі детально представлено та обговорено взаємодію між RFID-чіпом та рештою RFID-мітки, включаючи мікроконтролер, схему керування живленням та сенсор магнітного поля. Інтегральна схема керування живленням (P2110B) використовується для живлення мікроконтролера, сенсора Холла та RFID-чіпа, як показано на рисунку 3.8. Мікроконтролер (PIC18F47Q10) перетворює аналоговий вихід сенсора Холла в цифровий формат та записує його в пам'ять RFID-чіпа через

послідовний периферійний інтерфейс (SPI). На рисунку 3.8 показано шлях зв'язку компонентів RFID-мітки, які живляться від джерела живлення.

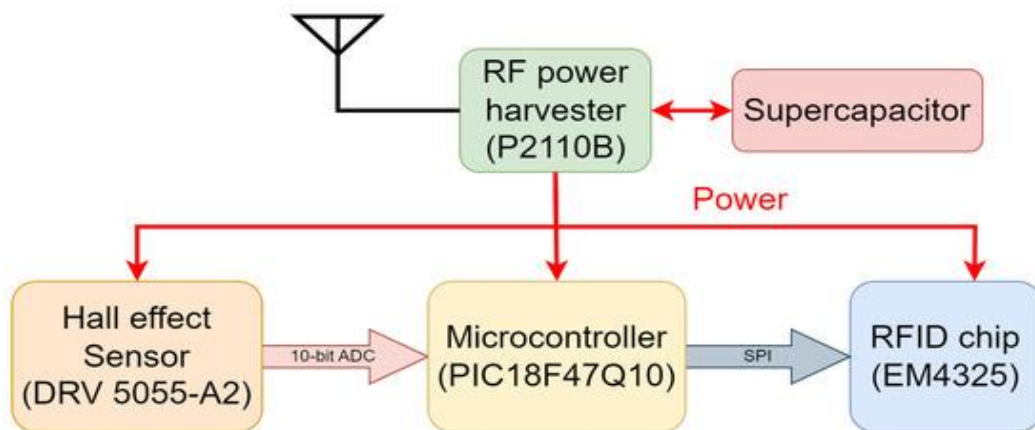


Рисунок 3.7 – Функціональна схема взаємозв'язку між компонентами RFID-мітки, що показує розподіл живлення та шлях передачі даних

Управління живленням

Powercast P2110B – це радіочастотний накопичувач потужності, призначений для перетворення радіочастотної енергії, що випромінюється RFID-зчитувачем, у постійний струм (DC) з максимально досяжною ефективністю 80 % [51]. Зібрана потужність постійного струму накопичується у зовнішньому конденсаторі ємністю мФ для забезпечення стабільного живлення інших компонентів мітки. Після того, як конденсатор заряджено до $V_{C\text{макс.}} = 1,25\text{В}$, комбайн підвищить напругу до $V_o = 3,3\text{В}$ для живлення мікроконтролера, сенсора Холла та мікросхеми RFIC. Система керування живленням P2110B містить регулятор падіння напруги. Якщо рівень напруги зовнішнього конденсатора падає нижче $V_{C\text{хв}} = 1\text{В}$, схема відключить живлення зовнішніх компонентів. Регулятор відновить подачу живлення, як тільки рівень напруги зовнішнього конденсатора досягне $V_{C\text{макс.}} = 1,25\text{В}$. Загальна енергія, що накопичується протягом періоду заряджання для нашої конструкції, становить

$$E_T = \frac{1}{2} C_{\text{ext}} (V_{C\text{макс.}}^2 - V_{C\text{хв}}^2) = 2.8\text{ мДж}. \quad (1)$$

Це максимальна енергія, яка може бути споживана під час процесу вимірювання магнітного поля. Тут, E_T – загальна енергія, що накопичується протягом 5-секундного часу перезаряджання. Максимальний час роботи (тобто час, протягом якого джерело живлення увімкнено) та споживана потужність під час кожного вимірювання

$$t_{ON} = \frac{C_{ext}}{15 V_o I_o} \approx 60 \text{ ms}, \quad (2)$$

$$P_{ON} = \frac{E_T}{t_{ON}} \approx 46.8 \text{ mW}, \quad (3)$$

де $I_o \approx 14,2 \text{ mA}$ – це виміряний струм, необхідний для всіх компонентів, що живляться від джерела живлення. Час роботи можна регулювати, використовуючи різні конденсатори, і він залежить від струму, необхідного для керування схемою. Процес заряджання/розряджання $C_{довн}$ показано на рисунку 3.8. У цьому випадку відстань між RFID-сенсором та RFID-зчитувачем становить 70 см. Жовта лінія показує напругу $C_{довн}$ варіюється між $V_{Схв} = 1\text{В}$ та $V_{Смакс} = 1,25\text{В}$, а зелена лінія показує вихідну напругу V_o , коли він увімкнений $V_o = 3,3\text{В}$ протягом 60 мс. Для відстані 70 см між сенсором та зчитувачем початковий час заряджання та наступне перезаряджання становлять 25 с та 5 с відповідно. На рисунку 3.9 показано часову шкалу роботи після завершення заряджання. Протягом 60-мілісекундного вікна часу «УВІМК.» мікроконтролер чекає 10 мс на стабілізацію вихідного сигналу сенсора Холла. Далі мікроконтролер перетворює аналогову напругу на цифрову та зберігає значення. Потім мікроконтролер вимикає транспондер (РЧ-інтерфейс) RFID-сенсора, що робить сенсор невиявлюваним RFID-зчитувачем. Цифрові дані сенсора потім записуються в пам'ять EPC RFID-чіпа. Після завершення передачі даних мікроконтролер вмикає транспондер, і RFID-сенсор знову стає виявлюваним.

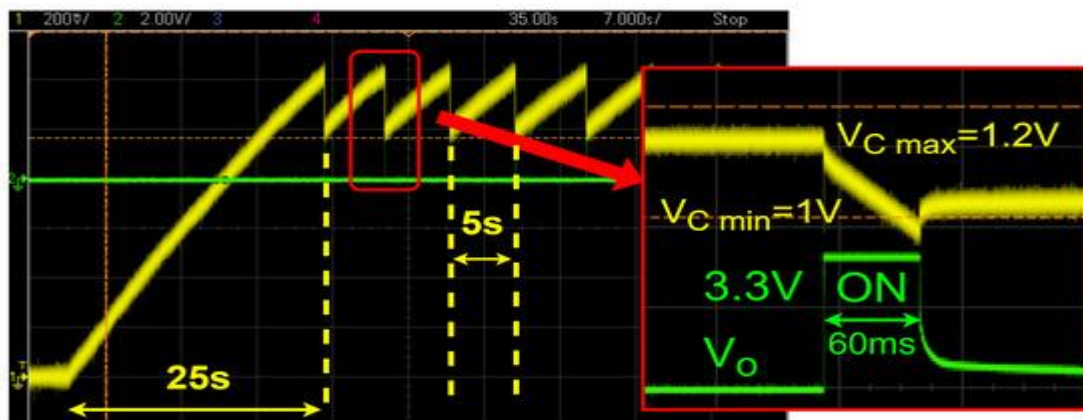


Рисунок 3.8 – Виміряна напруга зовнішнього конденсатора (жовта лінія) протягом початкового часу заряджання (25 с) та подальшого часу перезаряджання (5 с) після спрацювання сенсора. Вихідна напруга регулятора (зелена лінія) фіксована на 3.3В протягом 60 мс, під час яких відбувається вибірка магнітного поля та розряджається зовнішній конденсатор

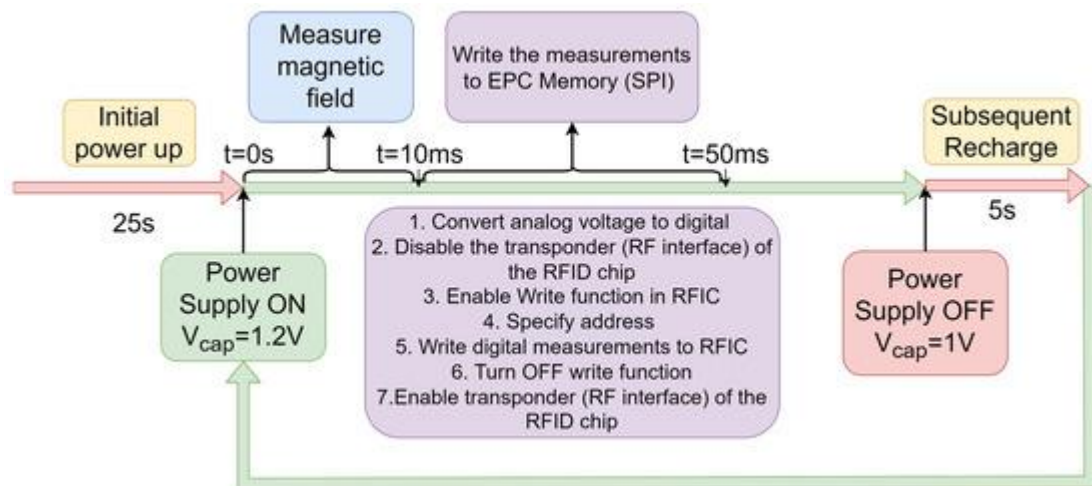


Рисунок 3.9 – Діаграма часової шкали роботи протягом часового вікна 60 мс, коли вихідний сигнал сенсора Холла зчитується та записується в пам'ять EPC RFID-чіпа. Протягом цього часу транспондер RFID-чіпа вимкнений, що робить його невиявлюваним, доки не буде завершено вимірювання магнітного поля та передачу даних на RFID-чіп

Зв'язок бюджету та ефективності

RFID-зчитувач, що використовується в цій роботі, здатний передавати безперервний радіочастотний сигнал потужністю 27 дБм. RFID-зчитувачу потрібна мінімальна потужність прийому від модульованого сигналу зворотного розсіювання мітки– 66–66дБм. Використовуючи припущення про вільний простір, максимальна відстань для зчитування між міткою та зчитувачем визначається за допомогою

$$P_r^R = P_t^R e \left(G^R p_z G^T \right)^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^4 \quad (4)$$

де P_t^R – передана потужність від RFID-зчитувача, $G^R G^T$ – коефіцієнт підсилення антени зчитувача, p – ефективність поляризації, e – ефективність модуляції, z – коефіцієнт узгодження, G^T – коефіцієнт підсилення антени RFID-мітки, λ – довжина хвилі 915 МГц, а r – відстань між RFID-зчитувачем та міткою. Ідеальна максимальна відстань між RFID-міткою та RFID-зчитувачем становить $r = 5,1$ м, але через невідповідність між антеною мітки та чіпом, а також втрати на багатопроменевому поширенні, максимальна відстань зчитування $r \approx 2$ м було виміряно в лабораторії. Поки мітка знаходиться в діапазоні виявлення (тобто $r < 2$ м), функція зчитування мітки не змінюється. Однак час заряджання та подальший час перезаряджання суттєво залежать від відстані. Для $r = 70$ см, початковий час

заряджання та подальший час перезаряджання становлять 25 та 5 с відповідно. Коли відстань збільшується до $r = 1\text{p} = 1\text{м}$, початковий час заряджання збільшується до 45 с, тоді як наступне перезаряджання займає 10 с. При $r = 2\text{p} = 2\text{м}$, початковий час заряджання становить 180 с, а наступний час перезаряджання збільшується до 45 с.

Отриману потужність на вході збирача потужності та вихідну потужність збирача потужності можна визначити за допомогою

$$P_{\text{in}} = P_t^R G^R \text{pez} G^T \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (5)$$

$$P_{\text{out}} = \frac{E_T}{t_{\text{recharge}}}. \quad (6)$$

На відстань $r = 70\text{см}$, отримана вхідна потужність для комбайна становить $P_{\text{в}} = 0,71\text{мВт}$. Виходячи з накопиченої енергії (див. рівняння (3.1)) та виміряного часу перезаряджання, потужність на виході становить $P_{\text{вихід}} = 0,56\text{мВт}$, що призводить до ефективності $P_{\text{вихід}}/P_{\text{в}} = 78\%$. Потужність, необхідна кожному компоненту RFID-сенсора під час зчитування магнітного поля, наведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Потужність, необхідна кожному компоненту сенсора під час вимірювання магнітного поля.

Component	Supply Voltage	Required Power
Microcontroller	3.3 V	19.2 mW
Hall effect sensor	3.3 V	19.8 mW
RFID chip	3.3 V	3.3 mW

Сенсор Холла

Сенсор Холла — це напівпровідниковий прилад, який виявляє наявність та силу магнітного поля [53]. Напряга Холла лінійно пропорційна силі магнітного поля. Сенсор Холла DRV 5055-A2 [54], інтегрований з розробленою RFID-міткою, забезпечує високу чутливість та широкий динамічний лінійний діапазон. Сенсор Холла був протестований та відкалібрований за допомогою 3400-оборотного соленоїда з джерелом постійного струму, як показано на рисунку 3.10а. Виміряна вихідна напруга

сенсора як функція щільності магнітного потоку для напруги живлення $3.33.3V$ показано на рисунку 3.10 б. Виміряна чутливість становить $30.130.1\text{ мВ/мТл}$ у динамічному діапазоні $-14\text{--}14\text{ мТл}$ до $+14\text{--}14\text{ мТл}$. Як показано на рисунку 3.10 б, знаючи струм котушки, значення щільності магнітного потоку горизонтальної осі були визначені за допомогою COMSOL Multiphysics 6.0, комерційної програми для методу скінченних елементів від COMSOL Inc.

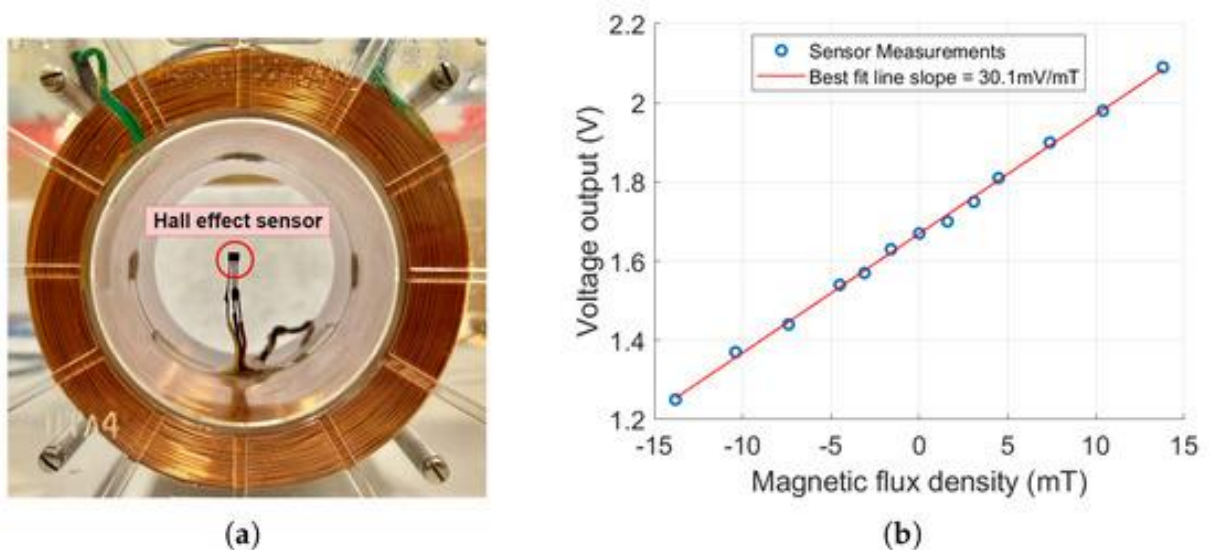


Рисунок 3.10 – (а) Схема калібрування сенсора Холла. (б) Напруга Холла як функція щільності магнітного потоку

3.5 Експериментальна установка для тестування RFID-сенсора магнітного поля

Для оцінки роботи сенсора було розроблено тестову установку, що імітує ті ж умови, що й лінія передачі постійного струму високої напруги. Джерело постійного струму, здатне генерувати струм короткого замикання до 1200 А , було підключено до провідника, подібного до тих, що використовуються в лініях передачі постійного струму високої напруги 500 кВ у Манітобі. Провідник постійного струму високої напруги мав діаметр 4 см , а петля, створена провідником, мала діаметр 2 м . Систему сенсора було розміщено поблизу провідника. Відстань між сенсором Холла та зовнішньою поверхнею провідника становила 3 см . Зчитувач RFID було розміщено на відстані 1 м від сенсора RFID. Відстань між сенсором на основі RFID та зчитувачем RFID не впливає на точність вимірювань магнітного поля, але впливає на час заряджання сенсора.

Експерименти проводилися для відстані 1 м між зчитувачем та міткою, а також для різних відстаней між сенсором та провідником. Струм, що протікає через провідник високовольтного постійного струму, змінювався від 0 до 1200 А. Виміряні щільності магнітного потоку показані на рисунку 3.11 для відстані від поверхні провідника до сенсора $d = 0,5$ та 3 см. Виміряні щільності магнітного потоку показують, що сенсор має високолінійну залежність між щільністю магнітного потоку та струмом. Максимальне відхилення від лінійної апроксимації становить 0,15 мТ та 0,05 мТ відповідно. Чутливість RFID-сенсора становить $7.5 \mu\text{T/A}$ для $d = 0,5\text{см}$ та $3.8 \mu\text{T/A}$ для $d = 3\text{см}$. Як показано на рисунку 3.11, коли відстань між сенсором і поверхнею провідника зменшується з 3 см до 0,5 см (еквівалентно відстані від центру провідника до сенсора 5 см до 2.5см), виміряна щільність магнітного потоку збільшується вдвічі, згідно з очікуваним $1/r$ поведінка щільності магнітного потоку поблизу нескінченно довгого провідника. Різниця між лінійною апроксимацією та вимірюваннями щільності магнітного потоку, можливо, пов'язана з неточностями положення та орієнтації сенсора Холла. Крім того, АЦП мікроконтролера вимагає точної опорної напруги 3.3 V, що постачається вихідною напругою збирача енергії, яка може бути шумною. Слід зазначити, що для відстані 1 м між RFID-сенсором та RFID-зчитувачем початковий час заряджання та подальший час перезаряджання становлять близько 45 с та 10 с відповідно.

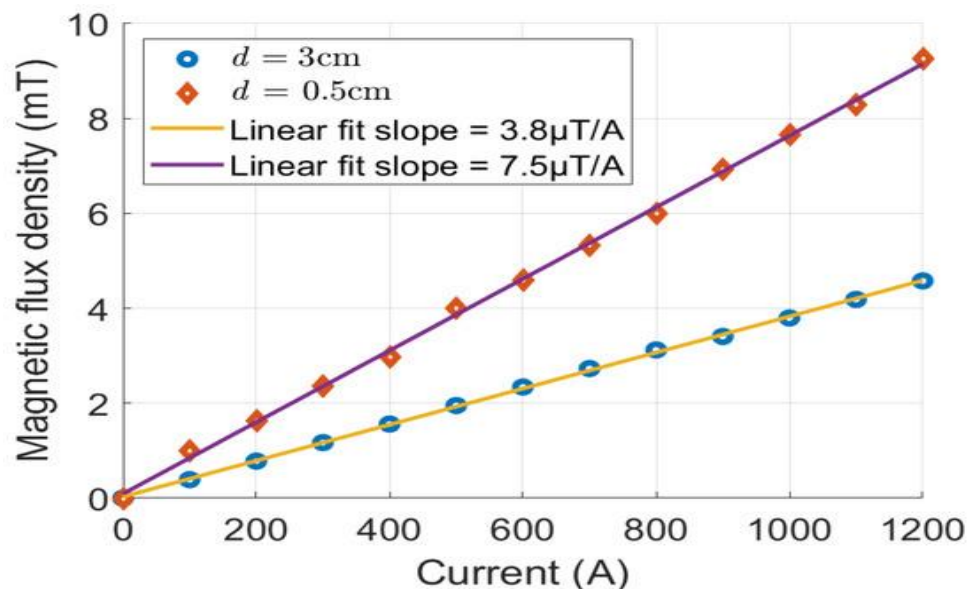


Рисунок 3.11 – Щільність магнітного потоку, виміряна за допомогою RFID-сенсора для відстані від поверхні провідника до сенсора $d = 0,5\text{см}$ та $d = 3\text{см}$. Чутливість $3.8 \mu\text{T/A}$ та $7.5 \mu\text{T/A}$ відповідно показано на рисунку.

На точність сенсора RFID впливають похибка сенсора Холла, похибки його положення та орієнтації відносно лінії передачі, а також похибка квантування АЦП. Похибка, спричинена сенсором Холла, становить 1% або $\approx 0,3$ мВ [44]. Для 10-бітного АЦП (1 біт для знака) та опорної напруги $3.33.3V$, похибка квантування становить 6.4 мВ, що домінує в похибці сенсора Холла. Це призводить до неточності $\pm 0,2$ мТ або ± 30 А. Похибка положення/орієнтації призведе до похибки лінійного масштабування, яку можна врахувати за допомогою калібрування.

Поблизу високовольтного обладнання, такого як комутаційна схема на електростанції, очікується високий рівень електромагнітного шуму. У нашому тестовому сценарії ми проводили вимірювання поруч із джерелом постійного струму, яке використовується для генерації постійного струму. На рисунку 3.12 показано додатковий шум, виміряний на суперконденсаторі, коли джерело постійного струму ввімкнено. Це демонструє здатність сенсора працювати в середовищі з високим рівнем електромагнітних перешкод.

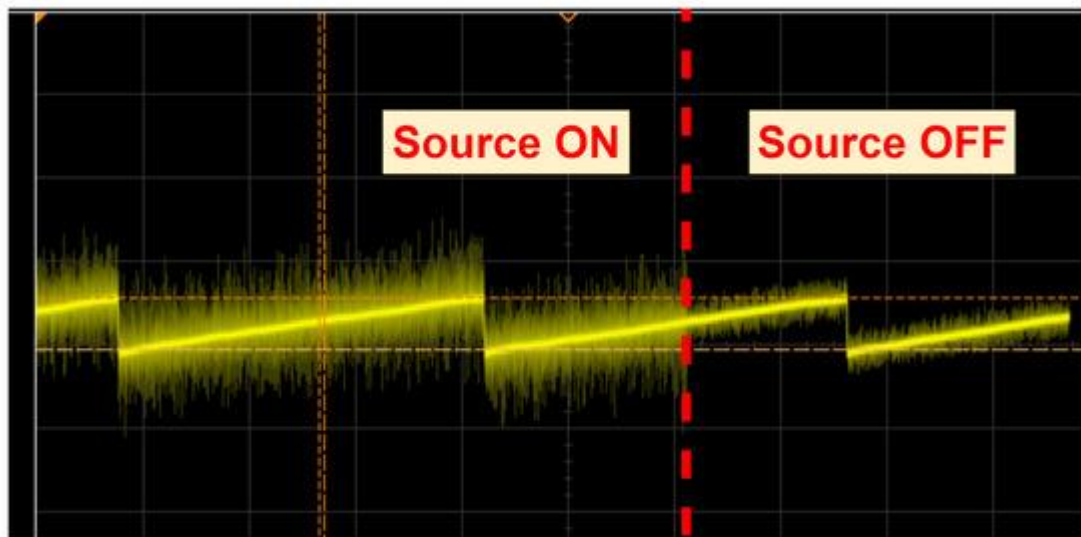


Рисунок 3.12 – Вимірювання напруга конденсатора сенсора, що показує шум, коли джерело постійного струму ввімкнено

3.6 Висновки до розділу

Було розроблено та протестовано сенсор на основі UHF RFID для вимірювання густини магнітного потоку постійного струму. Сенсор на основі RFID містить вбудований пристрій збору енергії, який збирає енергію, необхідну для роботи RFID-мітки, з енергії, що випромінюється RFID-зчитувачем. Було розроблено дві окремі антени: одну для зв'язку між RFID-чіпом та RFID-зчитувачем, а іншу для збору енергії. Для керування передачею даних між сенсором Холла та RFID-чіпом використовувався

мікроконтролер. Вся безбатарейна RFID-мітка була виготовлена на одній друкованій платі, що забезпечує компактний дизайн. Виготовлений сенсор магнітного поля на основі RFID був протестований в установці, що нагадувала лінію передачі HVdc та пропускала максимальний постійний струм 1200 А. Продуктивність сенсора оцінювалася при різних відстанях між сенсором та провідником на відстані 1 м від зчитувача до сенсора. Чутливість $7.5 \mu\text{T/A}$ та $3.8 \mu\text{T/A}$ вимірювалися для відстані між сенсором та провідником 0,50,5 та 3 см відповідно. Сенсор має динамічний діапазон від 0 до 9 мТл, що відповідає постійному струму від 0 до 1200 А. Сенсор демонструє максимальне відхилення від лінійної апроксимації 0,15 мТ та 0,05 мТ та відстань від мітки до провідника 3 см. Існує компроміс між відстанню опитування та часом заряджання/перезаряджання. Для відстані 1 м між RFID-зчитувачем та сенсором на основі RFID було виміряно початкове заряджання та подальший час перезаряджання 45 с та 10 с. Продуктивність нашого сенсора оцінювалася в контрольованому лабораторному середовищі. Джерелом шуму під час оцінювання було, головним чином, одне джерело високого струму. Шум може бути набагато сильнішим у польових умовах, наприклад, на конверторній підстанції. Наш сенсор магнітного поля на основі RFID не компенсує температурні впливи, спричинені нагріванням провідників лінії електропередачі в умовах високого струму. Крім того, характеристики пристрою на ефекті Холла адаптовані до бажаного динамічного діапазону.

У RFID-сенсору, описаному в цій статті, живлення отримується від RFID-зчитувача. Ефективна ізотропна випромінювана потужність (EIRP) RFID-зчитувача обмежена 36 дБм, що обмежує доступну потужність для роботи компонентів мітки та/або відстань запиту. Використання антени RFID-мітки з вищою спрямованістю може забезпечити більшу відстань запиту. Включення кількох схем збору енергії, які можуть отримувати енергію з різних джерел навколишнього середовища, може покращити загальну функціональність системи.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

На ранніх стадіях розвитку охорони праці та піклування про здоров'я працівників, коли виробництво мало невеликі масштаби, а технології були простими, заходи безпеки впроваджувалися безпосередньо в процесі роботи. Роботодавці несли відповідальність за безпеку своїх співробітників, забезпечуючи їх захисним одягом, навчаючи основам безпечної праці та створюючи прийнятні умови. Проте, з розвитком науково-технічного прогресу, що призвів до ускладнення технологій та виробництва, такий підхід перестав відповідати вимогам сучасної техносфери. Одним із фундаментальних принципів сучасної охорони праці є своєчасне впровадження заходів безпеки вже на етапах проєктування, конструювання та експлуатації виробів. Це дає змогу уникнути або значно зменшити негативний вплив технологічних процесів на здоров'я людини.

Предметом дослідження є параметричні перетворювачі магнітного поля з частотним виходом для сенсорних мереж. На дослідника, відповідно до Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», мали вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

У відповідності до визначених факторів розробляємо технічні рішення щодо безпечного виконання роботи, а також з гігієни праці та виробничої санітарії.

4.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи

4.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Ефективне обладнання робочого місця є ключовою умовою для створення комфортних і безпечних умов праці, а також для зростання продуктивності. При його організації необхідно враховувати наступні основні аспекти [61]:

1. Антропометричні вимоги. Робоче місце повинно бути пристосоване для зручного використання працівниками з різними антропометричними даними. Це передбачає правильний вибір висоти робочого столу та стільця, а також оптимальне розміщення обладнання в легкодоступній зоні.

2. Фізичні вимоги. Організація робочого місця має бути спрямована на мінімізацію ризиків травмування та розвитку професійних захворювань, пов'язаних з фізичними навантаженнями. Для цього необхідно забезпечити належне та достатнє освітлення, а також уникнути надмірного шуму та вібрації.

3. Психологічні вимоги. Робоче місце слід обладнати таким чином, щоб сприяти комфортній та продуктивній роботі. Це включає створення позитивної атмосфери, забезпечення достатнього особистого простору та можливостей для короткочасного відпочинку.

Дослідження на тему «Параметричні перетворювачі магнітного поля з частотним виходом для сенсорних мереж» проводилося в приміщенні площею 24,6 м² з висотою стелі 3,3 метра, де облаштовано 4 комп'ютеризовані робочі місця. Таким чином, на кожного працівника припадає 6,2 м² площі та 20,3 м³ повітря робочої зони, що відповідає нормативним вимогам НПАОП 0.00-7.15-18, згідно з якими мінімальна площа на одне робоче місце з комп'ютером становить 6 м², а мінімальний об'єм – 20 м³. Кожне робоче місце оснащено робочим столом площею 1,3 м², стільцем та персональним комп'ютером у складі монітора, системного блоку, клавіатури та миші.

Рациональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення інструментів і пристосувань, документації, деталей як у процесі роботи, так і при їх зберіганні і забезпечувати зручну робочу позу, виконання трудових процесів з максимальною економією рухів робітника, а також повну безпеку праці. Важливою вимогою є правильне використання відведеної для робочого місця виробничої площі. На робочому місці фіксуються оперативне і допоміжне робочі простору. В оперативному просторі розміщується необхідне обладнання, у допоміжному – рідше використовувані засоби і предмети праці. Оперативний простір може підрозділятися на робочі зони різної значимості.

4.1.2 Електробезпека приміщення

Лінії електричної мережі ПК у приміщенні реалізовані як окрема групова трипровідна мережа, використовуючи фазовий, нульовий робочий та нульовий захисний провідники. При цьому площа перерізу нульового

робочого та нульового захисного провідників повинна бути не меншою за площу перерізу фазового провідника. Напруга в цій мережі складає 380 x 220 В (фазна напруга (фаза - "нуль") - 220 В, а міжфазна лінійна (фаза - фаза) - 380 В). Категорія умов з приводу небезпеки електротравматизму вважається без підвищеної небезпеки [62].

В досліджуваному приміщенні мережі для підключення ПК мають електричні з'єднання та розетки, які забезпечують захист від ураження електричним струмом. Це досягається за рахунок того, що нульовий захисний провідник підключається до розетки перед фазовим і нульовим робочим провідниками. При відключенні мережі порядок дій повинен бути зворотним. Мережі штепсельних з'єднань та електричних розеток виконані за типовою схемою, по 3-6 в одному ланцюжку. Оскільки вони розташовані вздовж стін, проводи прокладені по підлозі в металевих трубах і гнучких металевих каналах. Металеві трубки і гнучкі металеві канали заземлені для захисту від ураження електричним струмом у разі пробоя ізоляції проводів.

Для забезпечення безпеки від електротравм в приміщенні вживаються наступні заходи [63]:

1. Заземлення електроустановок, що передбачає відведення надлишкового електричного струму в землю, запобігаючи перенапрузі та можливим електротравмам.
2. Використання захисних пристроїв (автоматичні вимикачі та розетки з реле напруги (RCD)), які реагують на надлишковий струм або замикання і відключають електроустановку для захисту від електротравм та пожеж.
3. Систематичне обслуговування електрообладнання (правильне підключення та розміщення кабелів та приладів, регулярна перевірка на наявність пошкоджень) та заміну старого обладнання.
4. Безпечна організація робочого простору, зокрема відведення електричних кабелів та проводів від місця знаходження персоналу, щоб уникнути їх потрапляння під ноги.
5. Правильна експлуатація електричних приладів, що передбачає уникання перевантаження розеток, неправильного вставлення штекерів та відключення невикористаних приладів від електромережі.
6. Періодичне навчання персоналу вимогам безпеки, щоб працівники усвідомлювали ризики та мали знання про заходи для уникнення електротравм та нещасних випадків.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат виробничих приміщень – це комплекс фізичних параметрів виробничого середовища, таких як температура, вологість, швидкість руху повітря, температура поверхонь та інтенсивність теплового випромінювання, що визначають теплообмін працівників з навколишнім середовищем. Нормалізація мікроклімату в виробничих приміщеннях проводиться з урахуванням теплових характеристик приміщення, категорії виконуваних робіт за рівнем важкості та пори року. Несприятливі параметри мікроклімату (підвищена або знижена температура, висока вологість, значна швидкість руху повітря, екстремальні температури поверхонь) можуть порушувати теплообмін в організмі людини, спричиняючи тепловий дискомфорт. Це, у свою чергу, може призвести до перегрівання або переохолодження організму, зниження працездатності, погіршення здоров'я та ускладнення існуючих захворювань. Дотримання встановлених норм мікроклімату є важливим аспектом охорони праці, оскільки забезпечує безпечні умови праці та зменшує ймовірність нещасних випадків і професійних захворювань [65].

Проведення дослідження відноситься до категорії робіт Ia. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату здійснюється організована вентиляція приміщення, регулювання опалення та кондиціонування повітря.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забезпечення чистого повітря в робочій зоні є не просто елементом комфорту, а ключовим чинником збереження здоров'я та підвищення продуктивності працівників. Чисте повітря мінімізує ризик розвитку

професійних захворювань, таких як астма, алергічні реакції та респіраторні інфекції. Крім того, воно позитивно впливає на загальне самопочуття працівників, покращує їхню концентрацію та працездатність. У приміщенні, де проводилося дослідження, можливе підвищення концентрації пилу та озону. Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин, виявлених у цьому приміщенні, представлені у таблиці 4.2 [69].

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	ГДК, мг/м ³	Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	10	4	4
Озон	0,16	0,03	1

Для підтримання чистоти повітря в робочій зоні використовується механічна вентиляція, що забезпечує відведення забрудненого повітря та надходження свіжого. Додатково важливим є регулярне прибирання та провітрювання приміщення з метою видалення пилу, бруду та інших забруднюючих речовин.

4.2.3 Виробниче освітлення

Виробниче освітлення – це важливий фактор безпеки, продуктивності та комфорту працівників. Воно впливає на такі показники, як:

1. **Безпека праці.** Достатнє освітлення допомагає працівникам бачити небезпечні зони та перешкоди, що може допомогти запобігти нещасним випадкам. Натомість, недостатня освітленість може призвести до падінь, травмування рук та очей, а також до помилок під час роботи з обладнанням.
2. **Продуктивність праці.** Достатнє освітлення сприяє кращій концентрації працівників, підвищує їхню працездатність та зменшує стомлюваність [70].

Виробниче освітлення може бути природним або штучним. Природне освітлення створюється сонячним світлом, яке проникає через вікна або світлові люки. Воно є найкращим типом освітлення, м'яким і комфортним для очей. Коли природне освітлення є недостатнім або неможливим, необхідно використовувати штучне освітлення. Штучне освітлення створюється за допомогою штучних джерел світла, таких як люмінесцентні лампи, світлодіодні лампи тощо. Норми освітленості для штучного

освітлення та КПО при природному та комбінованому освітленні, відповідно до умов виконання роботи наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
високої точності	Від 0,15 до 0,3	III	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення належного рівня освітлення передбачено такі заходи: встановлення достатньої кількості освітлювальних приладів, використання додаткового підсвічування, розміщення джерел світла на оптимальній висоті та систематичне обслуговування системи освітлення.

4.2.4 Виробничий шум

Під час проведення дослідження на робочому місці може виникати шум, джерелами якого є різноманітне обладнання, а саме: системні блоки комп'ютерів, принтери, сканери, кондиціонери, вентилятори охолодження та трансформатори. Нормативні значення щодо шуму, ультразвуку та інфразвуку на робочих місцях регламентуються ДСанПіН 3.3.6.037-99. Згідно з характером виконуваних робіт та характеристиками шуму, допустимі рівні звукового тиску повинні відповідати гігієнічним нормативам, а рівень звуку L_A не повинен перевищувати 50 дБА, як зазначено у таблиці 4.4 [71].

Таблиця 4.4 – Допустимі рівні звукового тиску та звуку

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення прийнятних рівнів шуму (поліпшення шумового середовища) в приміщенні передбачено дотримання правил виробничої поведінки. Рівень шуму в приміщенні відповідає нормативним вимогам.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Електромагнітне випромінювання здатне по-різному впливати на здоров'я людини, що залежить від його частоти та інтенсивності. Сильне випромінювання може бути пов'язане з ризиком онкологічних захворювань, тоді як слабе може спричиняти головний біль, запаморочення та порушення сну. Оскільки дослідження проводилося з використанням персонального комп'ютера, на робочому місці існує потенціал для підвищення рівня електромагнітного випромінювання.

Гранично допустимі значення напруженості електричного та магнітного полів промислової частоти, при врахуванні тривалості їх впливу, регулюються відповідно до Санітарних правил і нормативів (СанПіН) 2.2.4.1191-03 [72]. Для електромагнітних полів промислової частоти (50-60 Гц) допустима напруженість поля становить 5 кВ/м. Для радіочастотних полів (від 30 Гц до 300 ГГц) допустимі рівні становлять 25 В/м для електричного поля та 250 нТл для магнітного поля.

З метою мінімізації впливу електромагнітного випромінювання на розробника рекомендується дотримуватися оптимального балансу між роботою та відпочинком. Це передбачає необхідність регулярних перерв під час роботи, перебування на свіжому повітрі, заняття фізичною активністю та ведення здорового способу життя. Систематичні перерви сприятимуть скороченню загального часу впливу електромагнітного випромінювання. Фізичні вправи допоможуть зміцнити організм та підвищити імунітет. Здоровий спосіб життя, у свою чергу, сприятиме зниженню ймовірності розвитку захворювань, пов'язаних з дією електромагнітних полів.

4.3 Пожежна безпека

Метою пожежної безпеки об'єкта є попередження виникнення пожежі на визначеному чинними нормативами рівні, а у випадку виникнення пожежі – обмеження її розповсюдження, своєчасне виявлення, гасіння пожежі, захист людей і матеріальних цінностей. В приміщенні, де здійснювалося дослідження використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д». За вогнестійкістю приміщення відноситься до другої категорії згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [73]. Робоча зона дослідника відноситься до класу вибухонебезпечності В-Па, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилу і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності.

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Система попередження пожежі – це комплекс організаційних заходів та технічних засобів, спрямованих на усунення умов виникнення пожежі. У дослідженому приміщенні є відповідальний за пожежну безпеку працівник. Меблі та обладнання розміщені таким чином, щоб забезпечувався вільний евакуаційний прохід до дверей виходу з приміщення. Евакуаційні шляхи та виходи постійно утримуються вільними.

Документи, папір та інші горючі матеріали зберігаються на відстані не менше 1 м від електрощитів, електрозборок і електрокабелів, 0,5 м від світильників та 0,25 м від приладів опалення. Засоби протипожежного захисту (пожежні крани, пожежна та охороно - пожежна сигналізація, первинні засоби пожежегасіння тощо), які є у приміщенні утримуються у справному стані [73].

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні такі:

- несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників, пересихання електроізоляційних матеріалів);
- використання електропобутових пристроїв (електрочайники, обігрівачі); попадання вологи на працююче електрообладнання;

Для запобігання виникнення пожежі здійснюються такі заходи:

- щорічне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за пожежну безпеку;
- утримання в справному стані засобів протипожежного захисту;
- своєчасне інформування про несправність пожежної техніки, систем

протипожежного захисту, водопостачання тощо.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту – це сукупність організаційних заходів, а також технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних факторів пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї.

У приміщені на випадок виникнення пожежі для обмеження її розповсюдження знаходиться переносний вуглекислотний вогнегасник типу ВВК-5, що відповідає нормам. Підходи до засобів первинного пожежогасіння та відключення електросхем устаткування вільні [74].

З метою дотримання протипожежного захисту забороняється:

- влаштовувати тимчасові електромережі, застосовувати саморобні плавкі вставки в запобіжниках, прокладати електричні проводи безпосередньо по горючій основі, експлуатувати світильники зі знятими ковпаками (розсіювачами), використовувати саморобні подовжувачі, які не відповідають вимогам Правил улаштування електроустановок;
- пристосовувати вимикачі, штепсельні розетки для підвішування одягу та інших предметів, обгортати електролампи й світильники, клеювати ділянки електропроводки горючою тканиною, папером;
- використовувати побутові електрокип'ятильники, чайники і таке інше (окрім приміщень, спеціально відведених та обладнаних для цього), залишати без нагляду увімкненими в електромережу кондиціонери, комп'ютери, лічильні та друкарські машинки тощо;
- захаращувати підступи до засобів пожежогасіння, використовувати пожежні крани, рукави й пожежний інвентар не за призначенням, зберігати документи, різні матеріали, предмети та інвентар у шафах (нішах) інженерних комунікацій;
- палити (окрім спеціально відведених для цього адміністрацією місць, позначених написом «Місце для паління» та забезпечених урною чи попільницею з негорючого матеріалу), проводити зварювальні та інші вогневі роботи без оформлення відповідального дозволу, застосовувати легкозаймисті рідини.

ВИСНОВКИ

У першому розділі представлені найновіші дослідження, присвячені новим методам, матеріалам і пристроям магнітометрії, які можна впровадити в галузі IoT сенсорних мереж. Оскільки вони, як правило, високочутливі та легко об'єднуються в системи, ці методи мають багато перспектив у сприйнятті магнітних сигналів та в пристроях IoT сенсорних мереж.

У другому розділі представлені результати досліджень технології MFEN, яка є ефективним методом живлення сенсорів Інтернету речей для інтеграції в інтелектуальні мережі, що забезпечує альтернативу використанню звичайних батарей. До них належать перевантаження по струму, неочікувані відключення, удари блискавки, екстремальні температури та висока вологість. Інші проблеми, які необхідно вирішити, включають інтеграцію з існуючою інфраструктурою для забезпечення сумісності, проектування з урахуванням електромагнітних перешкод та гармонійних спотворень, а також забезпечення легкого розгортання у віддалених місцях. Нарешті, необхідно провести аналіз витрат і вигод для масштабованості та довгострокової довговічності. Ці сценарії допоможуть оцінити стійкість та надійність запропонованої системи в різних умовах експлуатації. Незважаючи на незначний вплив одного пристрою на додатковий імпеданс та гармоніки через перемикання перетворювача в лінії електропередач, необхідні подальші дослідження для оцінки впливу MFEN на масштабне розгортання цих технологій.

У третьому розділі розроблено та протестовано сенсор на основі UHF RFID для вимірювання густини магнітного потоку постійного струму. Сенсор на основі RFID містить вбудований пристрій збору енергії, який збирає енергію, необхідну для роботи RFID-мітки, з енергії, що випромінюється RFID-зчитувачем. Було розроблено дві окремі антени: одну для зв'язку між RFID-чіпом та RFID-зчитувачем, а іншу для збору енергії. Для керування передачею даних між сенсором Холла та RFID-чіпом використовувався мікроконтролер. Вся безбатарейна RFID-мітка була виготовлена на одній друкованій платі, що забезпечує компактний дизайн. Виготовлений сенсор магнітного поля на основі RFID був протестований в установці, що нагадувала лінію передачі HVdc та пропускала максимальний постійний струм 1200 А. Продуктивність сенсора оцінювалася при різних відстанях між сенсором та провідником на відстані 1 м від зчитувача до сенсора. Чутливість $7.5 \mu\text{T/A}$ та $3.8 \mu\text{T/A}$ вимірювалися для відстані між сенсором та провідником 0,5 см та 3 см відповідно. Сенсор має динамічний діапазон від 0 до 9 мТл, що відповідає постійному струму від 0 до 1200 А.

Сенсор має максимальне відхилення від лінійної апроксимації 0,15 мТ та 0,05 мТ та відстань від мітки до провідника 3 см. Існує компроміс між відстанню опитування та часом заряджання/перезаряджання. Для відстані 1 м між RFID-зчитувачем та сенсором на основі RFID було виміряно початкове заряджання та подальший час перезаряджання 45 с та 10 с. Продуктивність нашого сенсора оцінювалася в контрольованому лабораторному середовищі. Джерелом шуму під час оцінювання було, головним чином, одне джерело високого струму. Шум може бути набагато сильнішим у польових умовах, наприклад, на конверторній підстанції. Наш сенсор магнітного поля на основі RFID не компенсує температурні впливи, спричинені нагріванням провідників лінії електропередачі в умовах високого струму. Крім того, характеристики пристрою на ефекті Холла адаптовані до бажаного динамічного діапазону.

У RFID-сенсорі живлення отримується від RFID-зчитувача. Ефективна ізотропна випромінювана потужність (EIRP) RFID-зчитувача обмежена 36 дБм, що обмежує доступну потужність для роботи компонентів мітки та/або відстань запиту. Використання антени RFID-мітки з вищою спрямованістю може забезпечити більшу відстань запиту. Включення кількох схем збору енергії, які можуть отримувати енергію з різних джерел навколишнього середовища, може покращити загальну функціональність системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bourguignon, M.; Jousmäki, V.; Dalal, S.S.; Jerbi, K.; De Tiège, X. Coupling between human brain activity and body movements: Insights from non-invasive electromagnetic recordings. *Neuroimage* 2019, 203, 116177.
2. García-Alba, J.; Ramírez-Toraño, F.; Esteba-Castillo, S.; Bruña, R.; Moldenhauer, F.; Novell, R.; Romero-Medina, V.; Maestú, F.; Fernández, A. Neuropsychological and neurophysiological characterization of mild cognitive impairment and Alzheimer's disease in Down syndrome. *Neurobiol. Aging* 2019, 84, 70–79.
3. Yildirim, M.; Candan, Z. Smart materials: The next generation in science and engineering. *Mater. Today* 2023, 1–7.
4. Wang, B.; Lee, T.L.; Qin, Y. Advances in Smart Materials and Structures. *Materials* 2023, 16, 7206.
5. Wang, W.; Xiang, Y.; Yu, J.; Yang, L. Development and Prospect of Smart Materials and Structures for Aerospace Sensing Systems and Applications. *Sensors* 2023, 23, 1545.
6. Xu, J.; Jiang, Y.; Chen, X.; Tang, Z.; Gao, Y.; Huang, M.; Wan, Y.; Cheng, P.; Wang, G. Photo- and magneto-responsive highly graphitized carbon based phase change composites for energy conversion and storage. *Mater. Today Nano* 2022, 19, 100234.
7. Ding, H.; Hao, L.; Mao, H. Magneto-responsive biocomposites in wound healing: From characteristics to functions. *J. Mater. Chem. B* 2024, 12, 7463–7479.
8. Taccola, S.; Bakhshi, H.; Sanchez Sifuentes, M.; Lloyd, P.; Tinsley, L.J.; Macdonald, J.; Bacchetti, A.; Cespedes, O.; Chandler, J.H.; Valdastrì, P.; et al. Dual-Material Aerosol Jet Printing of Magneto-Responsive Polymers with In-Process Tailorable Composition for Small-Scale Soft Robotics. *Adv. Mater. Technol.* 2024, 9, 2400463.
9. Zhang, Y.; Lesage, K.; Zhang, Y.; Tao, Y.; Van Tittelboom, K.; De Schutter, G. A comparison of magneto-responsive particles and testing protocols for active rheology control of cementitious materials. *Cem. Concr. Compos.* 2024, 146, 105390.
10. Lee, H.; Shin, T.H.; Cheon, J.; Weissleder, R. Recent Developments in Magnetic Diagnostic Systems. *Chem. Rev.* 2015, 115, 10690–10724.
11. Gloag, L.; Mehdipour, M.; Chen, D.; Tilley, R.D.; Gooding, J.J. Advances in the Application of Magnetic Nanoparticles for Sensing. *Adv. Mater.* 2019, 31, 1904385.

13. Anfossi, L.; Di Nardo, F.; Cavallera, S.; Giovannoli, C.; Baggiani, C. Multiplex lateral flow immunoassay: An overview of strategies towards high-throughput point-of-need testing. *Biosensors* 2018, 9, 2.
14. Ren, W.; Mohammed, S.I.; Wereley, S.; Irudayaraj, J. Magnetic Focus Lateral Flow Sensor for Detection of Cervical Cancer Biomarkers. *Anal. Chem.* 2019, 91, 2876–2884.
15. Wu, J.; Dong, M.; Zhang, C.; Wang, Y.; Xie, M.; Chen, Y. Magnetic lateral flow strip for the detection of cocaine in urine by naked eyes and smart phone camera. *Sensors* 2017, 17, 1286.
16. Moyano, A.; Salvador, M.; Martínez-García, J.C.; Socoliuc, V.; Vékás, L.; Peddis, D.; Alvarez, M.A.; Fernández, M.; Rivas, M.; Blanco-López, M.C. Magnetic immunochromatographic test for histamine detection in wine. *Anal. Bioanal. Chem.* 2019, 411, 6615–6624.
17. Fujiwara, K.; Oogane, M.; Kanno, A.; Imada, M.; Jono, J.; Terauchi, T.; Okuno, T.; Aritomi, Y.; Morikawa, M.; Tsuchida, M.; et al. Magnetocardiography and magnetoencephalography measurements at room temperature using tunnel magneto-resistance sensors. *Appl. Phys. Express* 2018, 11, 023001.
18. Huang, H.T.; Garu, P.; Li, C.H.; Chang, W.C.; Chen, B.W.; Sung, S.Y.; Lee, C.M.; Chen, J.Y.; Hsieh, T.F.; Sheu, W.J.; et al. Magnetoresistive Biosensors for Direct Detection of Magnetic Nanoparticle Conjugated Biomarkers on a Chip. *Spin* 2019, 9, 1940002.
19. Ren, L.; Yu, K.; Tan, Y. Applications and advances of magnetoelastic sensors in biomedical engineering: A review. *Materials* 2019, 12, 1135.
20. Zheng, C.; Zhu, K.; De Freitas, S.C.; Chang, J.Y.; Davies, J.E.; Eames, P.; Freitas, P.P.; Kazakova, O.; Kim, C.G.; Leung, C.W.; et al. Magnetoresistive Sensor Development Roadmap (Non-Recording Applications). *IEEE Trans. Magn.* 2019, 55, 1–30.
21. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. –303с.
22. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом. Монографія. –Вінниця: ВНТУ, 2013. – 261 с.
23. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Вербицький В.Г. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2001. –195 с.
24. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, “Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем”, – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 275 с, 1999.
25. О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Дослідження генератора

- електричних коливань на основі тунельно-резонансного діода”, Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 31 (70). №4. с.279-286, 2020.
26. О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Дослідження реактивних властивостей тунельно-резонансного діода”, Вісник Хмельницького національного університету, №4 (287), с.160-167, 2020.
 27. О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Дослідження сенсора температури з частотним виходом на основі квантової гетероструктури з від’ємним диференціальним опором”, Вісник Хмельницького національного університету, №2 (295), с.156-164, 2021.
 28. A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, O.O. Seletska, P. Kisała, K. Nurseitova, “Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors”, in Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 111761I (2019), 2019
 29. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Сенсори тиску і магнітного поля. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2005. –207 с.
 30. Я.О. Осадчук, “Автогенераторні мікроелектронні сенсори магнітного поля з біполярним і польовим магніточутливими транзисторами”, Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 34(73), №1, с.354-363, 2023.
 31. Я.О. Осадчук, “Мікроелектронні автогенераторні сенсори температури”, Вісник Хмельницького національного університету, №1, Т.1, (317), с. 237-247, 2023.
 32. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан, Радіовимірювальні перетворювачі на основі транзисторних структур з від’ємним опором для неруйнівного теплового контролю. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015.
 33. O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, V.V. Martyniuk, M.O. Prytula, “Investigation of a radio-frequency temperature transducer with a thermosensitive resistive element based on a complex compound of heterometallic β -diketonate”, ICEMS-BIOMED-2022 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1254 012027, 2022.
 34. О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Дослідження сенсора температури з частотним виходом на основі квантової гетероструктури з диференціальним від’ємним опором”, Вісник Хмельницького національного університету, №2, (295) с.156-164, 2021.
 35. A.V. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, “The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance”, Journal

- of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp), 2021.
36. *Осадчук О. В., Осадчук В. С., Семенов А. О., Коваль К. О.* Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором [Текст] : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов, К. О. Коваль. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — 336 с. - ISBN 978-966-641-405-5.
 37. *Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О.* Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором [Текст] : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. — 182 с.
 38. European Union. A Strategic Long-Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate-Neutral EU Economy; European Union: Luxembourg, Belgium, 2019.
 39. Borroy Vicente, S.; Fernandez, G.; Galan, N.; Llombart Estopinan, A.; Salani, M.; Derboni, M.; Giuffrida, V.; Hernandez-Callejo, L. Assessment of the Technical Impacts of Electric Vehicle Penetration in Distribution Networks: A Focus on System Management Strategies Integrating Sustainable Local Energy Communities. *Sustainability* 2024, 16, 6464.
 40. Yang, W.; Wang, H.; Wang, Z.; Fu, X.; Ma, P.; Deng, Z.; Yang, Z. Optimization Strategy of Electric Vehicles Charging Path Based on “Traffic-Price-Distribution” Mode. *Energies* 2020, 13, 3208.
 41. Agazar, M.; D'Avanzo, G.; Frigo, G.; Giordano, D.; Iodice, C.; Letizia, P.S.; Luiso, M.; Mariscotti, A.; Mingotti, A.; Munoz, F.; et al. Power Grids and Instrument Transformers up to 150 KHz: A Review of Literature and Standards. *Sensors* 2024, 24, 4148.
 42. Osheba, M.S.; Aboutaleb, A.M.; Desmet, J.; Knockaert, J. The Impact of Grid Distortion on the Power Conversion Harmonics of AC/DC Converters in the Supraharmonic Range. *Electronics* 2024, 13, 2244.
 43. Liang, D.; Ge, S.; Guo, H.; Wang, Y.; Liang, Z.; Chen, C. Monitoring Power Line Faults Using Impedance Estimation Algorithms in Power Line Communication Equipment. In *Proceedings of the 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, Chengdu, China, 25–27 December 2020; pp. 404–408.

44. Izmirliloglu, Y.; Pham, L.; Son, T.C.; Pontelli, E. A Survey of Multi-Agent Systems for Smartgrids. *Energies* 2024, 17, 3620.
45. Khawaja, A.H.; Huang, Q.; Khan, Z.H. Monitoring of Overhead Transmission Lines: A Review from the Perspective of Contactless Technologies. *Sens. Imaging* 2017, 18, 1–18.
46. D'Antona, G.; Di Rienzo, L.; Ottoboni, R.; Manara, A. Processing magnetic sensor array data for AC current measurement in multiconductor systems. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2001, 50, 1289–1295.
47. Ripka, P. Electric current sensors: A review. *Meas. Sci. Technol.* 2010, 21, 112001.
48. Callegaro, L.; Cassiago, C.; Gasparotto, E. On the Calibration of Direct-Current Current Transformers (DCCT). *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2015, 64, 723–727.
49. Zhu, K.; Lee, W.K.; Pong, P.W.T. Non-contact electric-coupling-based and magnetic-field-sensing-assisted technique for monitoring voltage of overhead power transmission lines. In *Proceedings of the 2015 IEEE SENSORS*, Busan, Republic of Korea, 1–4 November 2015; pp. 1–4.
50. Sun, X.; Huang, Q.; Hou, Y.; Jiang, L.; Pong, P.W.T. Noncontact Operation-State Monitoring Technology Based on Magnetic-Field Sensing for Overhead High-Voltage Transmission Lines. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2013, 28, 2145–2153.
51. Huang, Q.; Zhen, W.; Pong, P.W.T. A Novel Approach for Fault Location of Overhead Transmission Line With Noncontact Magnetic-Field Measurement. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2012, 27, 1186–1195.
52. Colella, R.; Tarricone, L.; Catarinucci, L. SPARTACUS: Self-Powered Augmented RFID Tag for Autonomous Computing and Ubiquitous Sensing. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2015, 63, 2272–2281.
53. Wei, Z.; Zhou, Z.; Yu, S.; Chen, J. Enhanced Indoor Positioning Using RSSI and Time-Distributed Auto Encoder-Gated Recurrent Unit Model. *Sensors* 2024, 24, 4815.
54. Mulloni, V.; Marchi, G.; Gaiardo, A.; Valt, M.; Donelli, M.; Lorenzelli, L. Applications of Chipless RFID Humidity Sensors to Smart Packaging Solutions. *Sensors* 2024, 24, 2879.
55. Song, C.; Wu, Z. Artificial Intelligence-Assisted RFID Tag-Integrated Multi-Sensor for Quality Assessment and Sensing. *Sensors* 2024, 24, 1813.
56. Occhiuzzi, C.; D'Uva, N.; Nappi, S.; Amendola, S.; Gialluca, C.; Chiabrando, V.; Garavaglia, L.; Giacalone, G.; Marrocco, G. Radio-Frequency-Identification-Based Intelligent Packaging: Electromagnetic

- Classification of Tropical Fruit Ripening. IEEE Antennas Propag. Mag. 2020, 62, 64–75.
57. Alves, L.N.; da Costa, E.G.; Serres, A.J.; Xavier, G.V.; Oliveira Neto, A.B. Design and application of a UHF RFID tag for monitoring pollution in high voltage towers. Electr. Power Syst. Res. 2023, 224, 109775.
 58. Wang, T.; He, Y.; Luo, Q.; Deng, F.; Zhang, C. Self-Powered RFID Sensor Tag for Fault Diagnosis and Prognosis of Transformer Winding. IEEE Sens. J. 2017, 17, 6418–6430.
 59. Wang, J.; Zhu, M.; Zhu, W.; Gu, Z.; Wang, X.; Zhu, Q. The Self-powered RFID Sensor System for Power Transformer Condition Monitoring. In Proceedings of the 2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Chongqing, China, 18–20 June 2021; Volume 4, pp. 613–617.
 60. Yang, Z.; See, K.Y.; Karim, M.F.; Weerasinghe, A. Chipless RFID-Based Sensing System for Partial Discharge Detection and Identification. IEEE Sens. J. 2021, 21, 2277–2285.
 61. ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення». https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2
 62. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 08 квітня 2014 року № 248.
 63. ДСан ПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ. Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>
 64. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
 65. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Режим доступу до сторінки: http://hrliga.com/index.php?module=norm_base&op=view&id=819
 66. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>.
 67. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028.

- 68.ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004.
- 69.НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77160
- 70.НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
- 71.НАПБ Б.01.008-2018 Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників - [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82176
- 72.НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>
- 73.ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759
- 74.ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: - [Електронний ресурс] - https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=59526

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

ПАРАМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Виконав: студент 4-го курсу, гр. ТКР-216
спеціальності 172 «Телекомунікації та
радіотехніка» ОП - («Радіотехніка»)

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Лобур О.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н. доцент каф. ІРТС

 Осадчук Я.О.

(прізвище та ініціали)

«10» 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

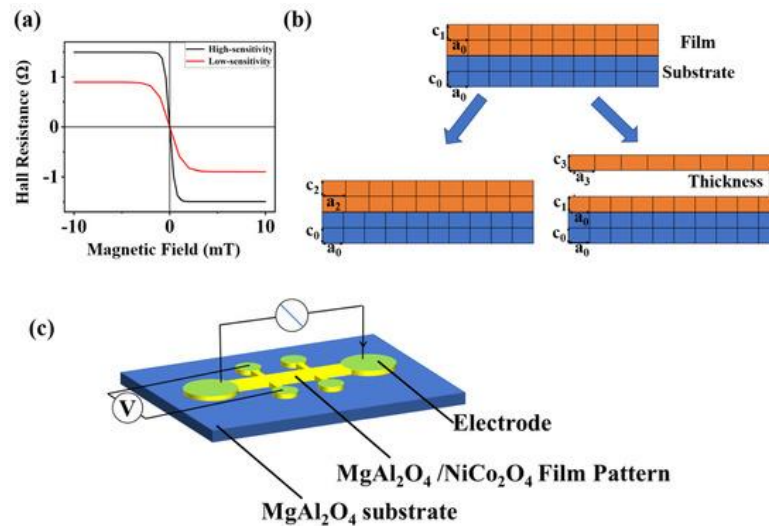


Рисунок 1 – (а) Принципова діаграма, що ілюструє різні сигнали опору Холла з високочутливих та низькочутливих профілів. (б) Основні методи регулювання напруженого стану плівки. (с) Принципова діаграма одноструктурного сенсора АНЕ

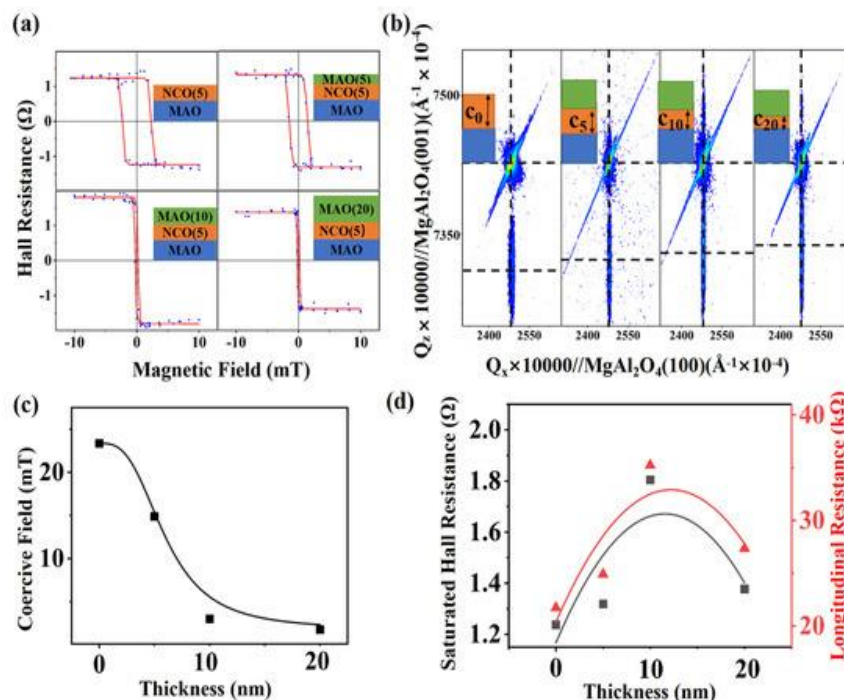


Рисунок 2 – (а) Залежність опору Холла від гістерезису магнітного поля чотирьох типів гетероструктур за кімнатної температури під дією вхідного струму 0,5 мА. (б) Картування взаємного простору, отримане навколо плівок NCO(206) у чотирьох типах гетероструктур. Вставки показують зміну постійної решітки (c – позаплощинна постійна решітки. Значення у правому нижньому куті стосується товщини плівок MAO). (с) Товщина плівок MAO впливає на коерцитивне поле стрижня Холла. (d) Товщина плівок MAO впливає на насичений опір Холла та поздовжній опір стрижня Холла

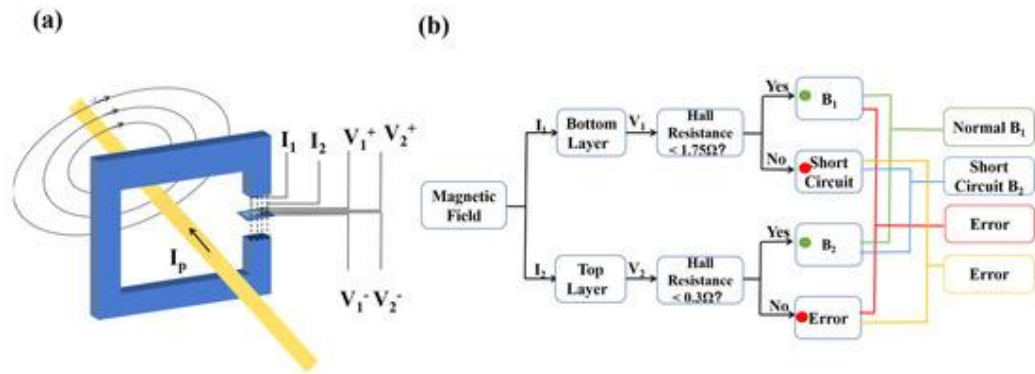


Рисунок 3 – (а) Принципова схема з'єднань сенсора. (б) Логіка виходу двохшарового сенсора АНЕ з багатофункціональним моніторингом

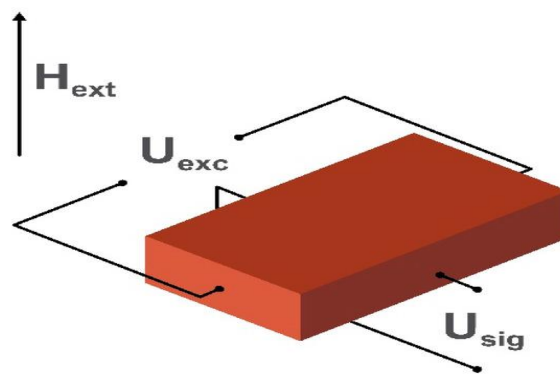


Рисунок 4 – Схематичне зображення чутливого елемента магнітометра на основі ефекту Холла, де прикладене зовнішнє магнітне поле H_{ext} виявляється напругою Холла U_{sig} , ортогональною до струму елемента, що створюється напругою керування U_{exc}

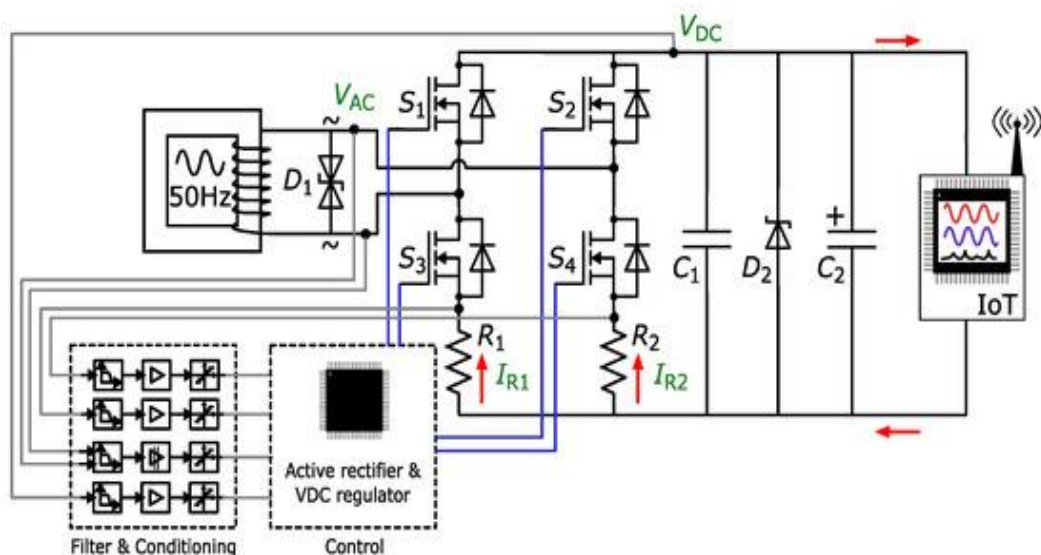


Рисунок 5 – Однокаскадний MOSFET-перетворювач Н-подібного мосту з вимірюваннями напруги та струму для контуру керування та діаграма збору енергії магнітного поля

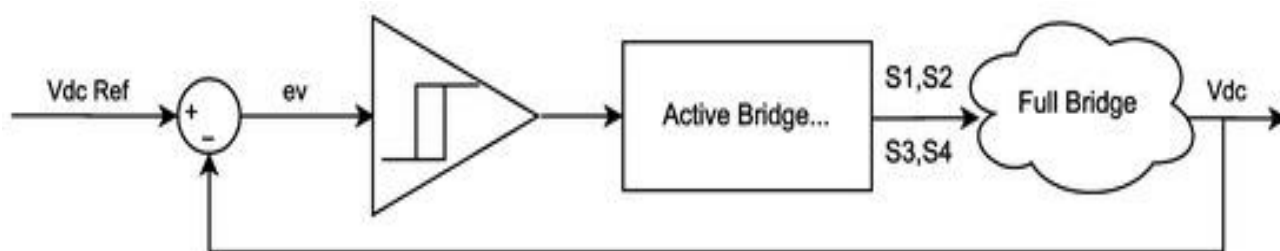


Рисунок 6 – Блок-схема схеми керування напругою шини постійного струму в MFEH

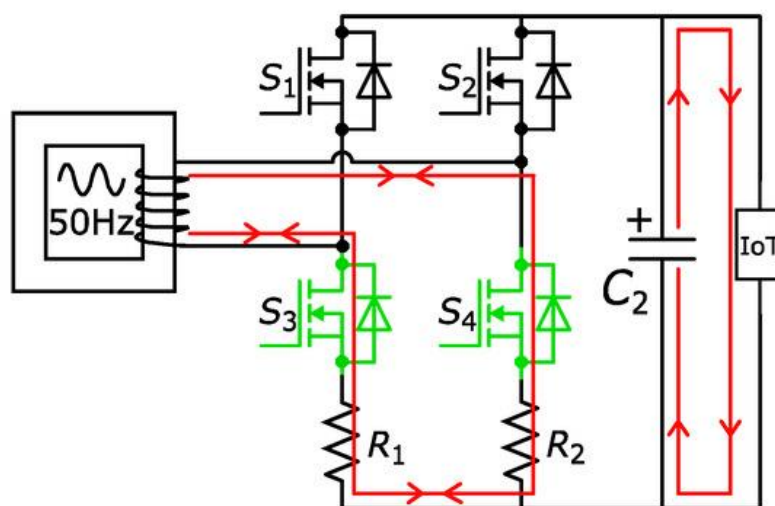


Рисунок 7 – Регулятор напруги постійного струму змушує коротке замикання вторинної котушки в накопичувачі енергії, щоб перешкодити подальшому збору енергії та запобігти перенапрузі в шині постійного струму

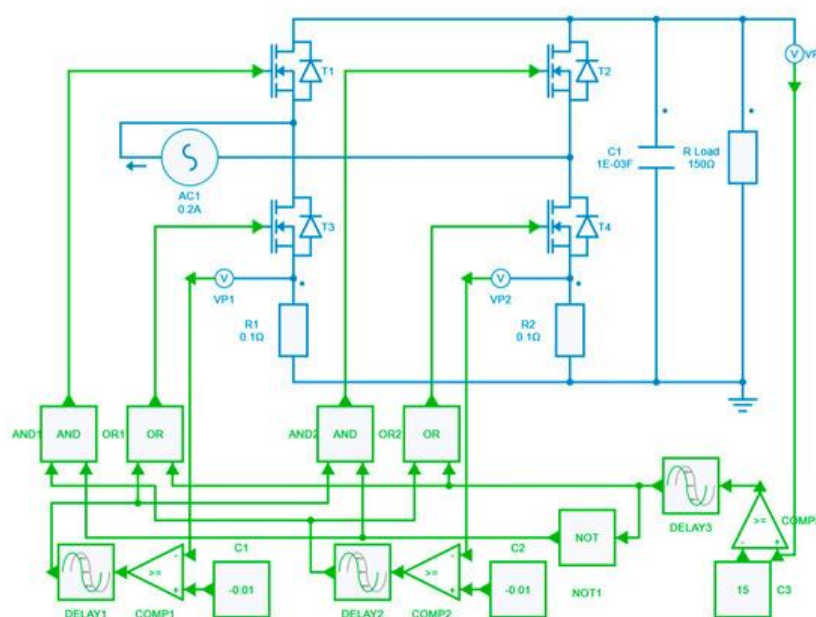


Рисунок 8 – Схема моделювання перетворювача потужності та архітектури керування

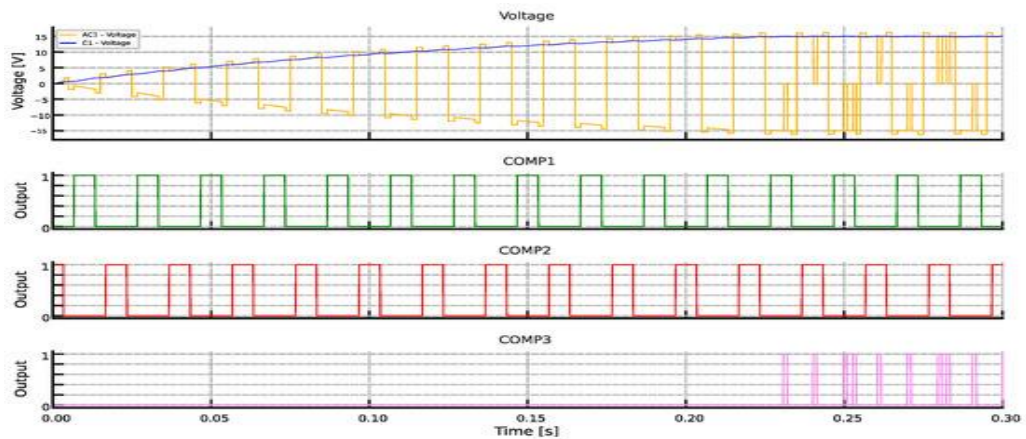


Рисунок 9 – Результати моделювання початкового перехідного процесу індукованої напруги на перетворювачі MFEN (жовтий), напруги шини постійного струму (синій) та сигналів перемикання компараторів MOSFET (зелений, червоний та фіолетовий, активні при 1)

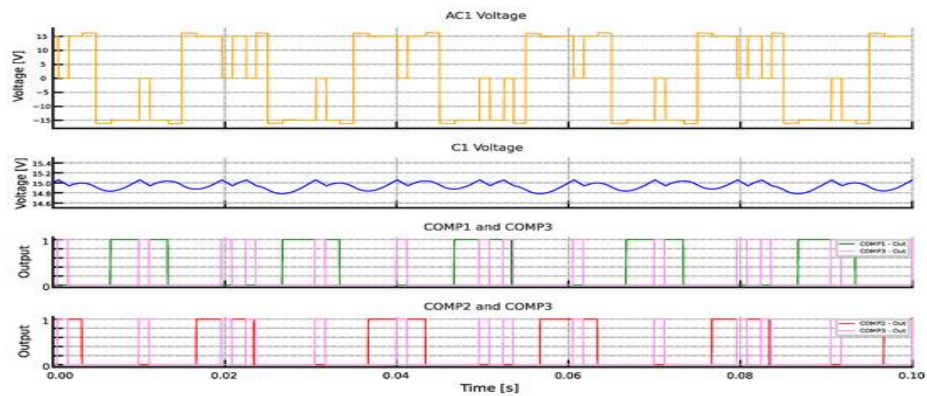


Рисунок 10 – Результати моделювання для стаціонарного стану індукованої напруги на перетворювачі MFEN (жовтий), пульсації напруги шини постійного струму (синій) та сигналів перемикання компараторів MOSFET (зелений, червоний та фіолетовий, активні при 1)

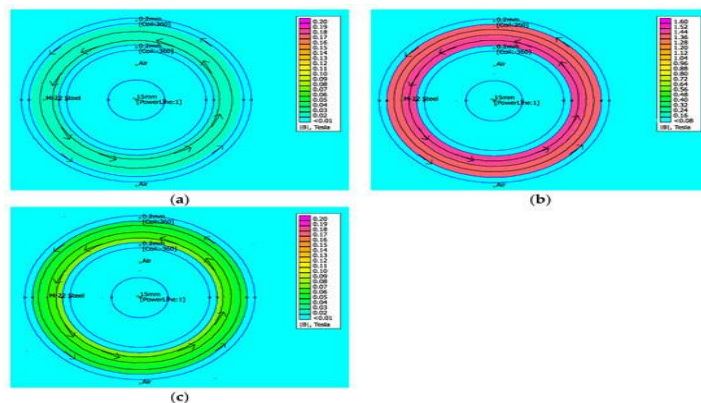


Рисунок 11 – Моделювання магнітного поля методом скінченних елементів для перетворювача MFEN з лінією живлення 60 А: (а) з короткозамкненою вторинною обмоткою; (б) з розімкнутою вторинною обмоткою; (с) у точці максимальної потужності

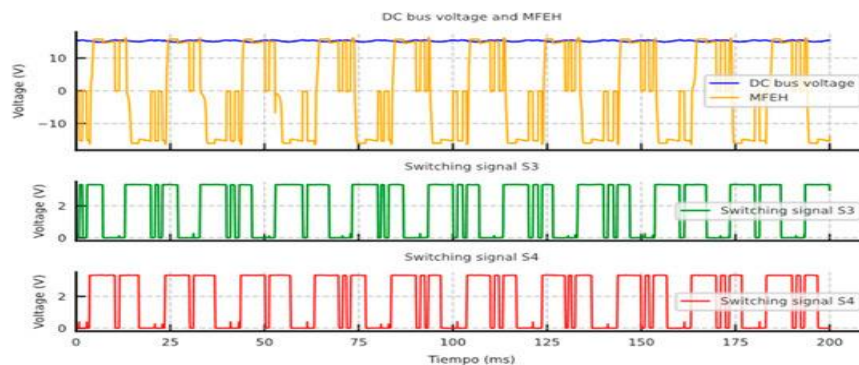


Рисунок 12 – Лабораторні вимірювання індукованої напруги на перетворювачі MFEH (жовтий), напруги шини постійного струму (синій) та сигналів перемикання MOSFET нижніх MOSFET (червоний та зелений, активні при 0 В), що емулюють струм 50% від максимального струму мережі живлення (300 А)

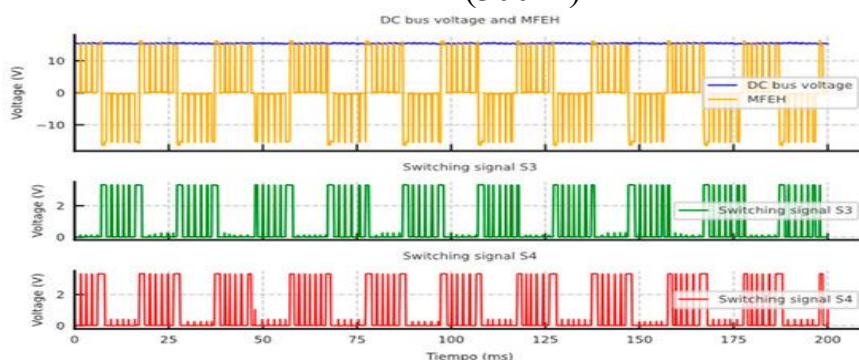


Рисунок 13 – Лабораторні вимірювання індукованої напруги на перетворювачі MFEH (жовтий), напруги шини постійного струму (синій) та сигналів перемикання MOSFET нижніх MOSFET (червоний та зелений, активні при 0 В), що емулюють максимальний струм мережі живлення (600 А)

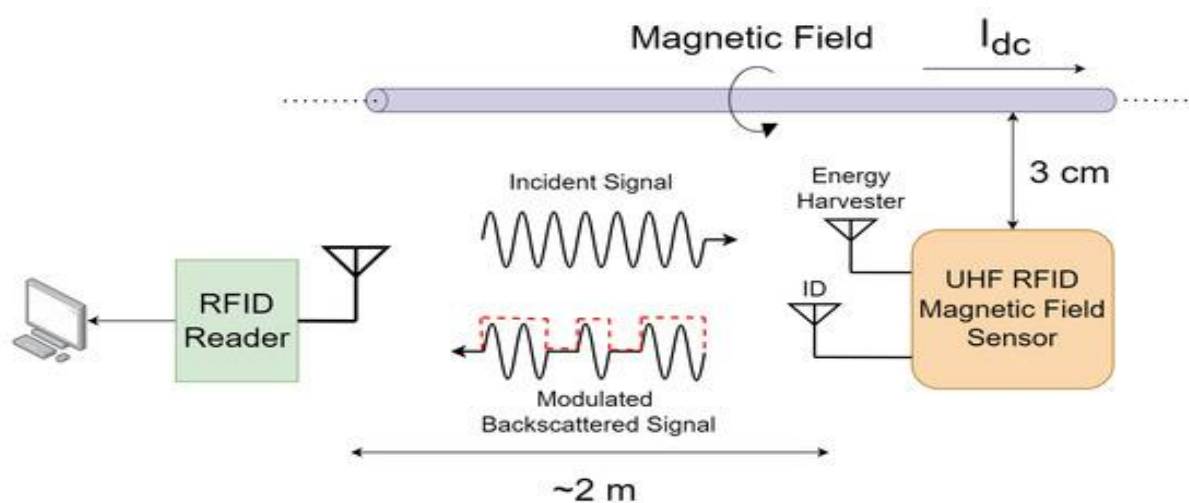


Рисунок 14 – Схема сенсорної мітки на основі UHF RFID для вимірювання магнітного поля повітряної лінії передачі постійного струму високої напруги

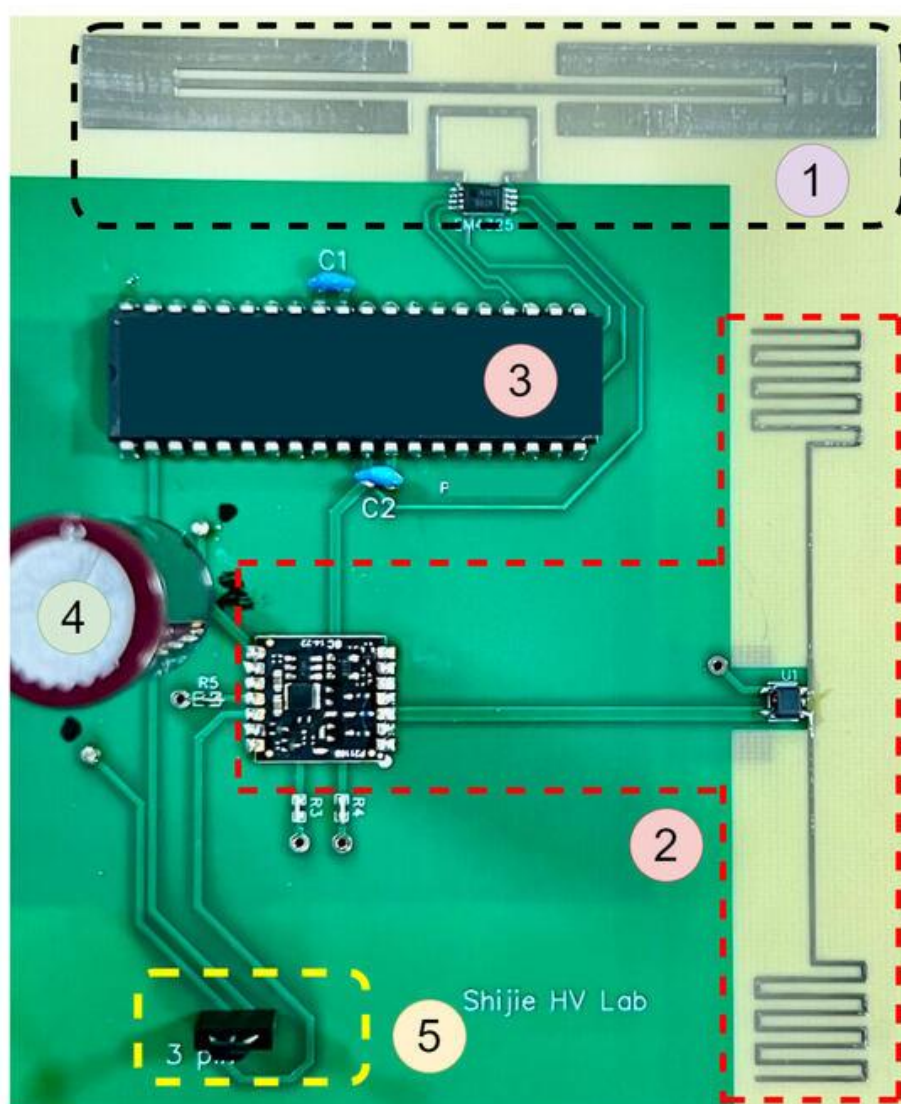
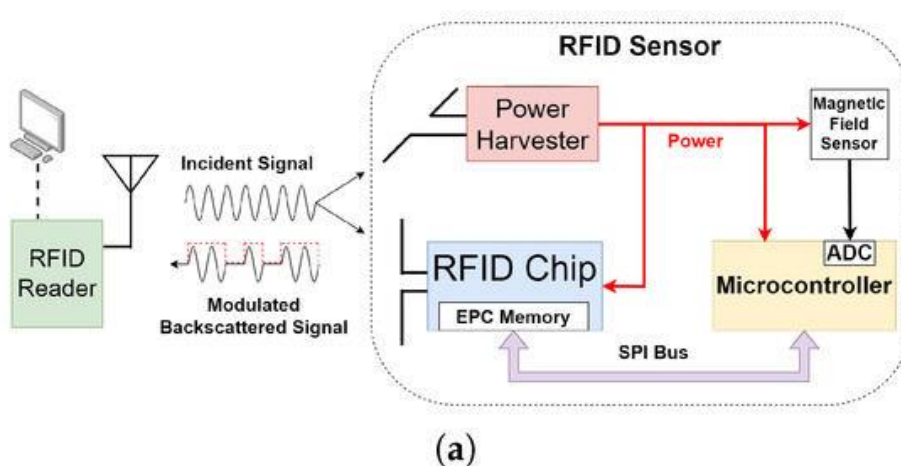


Рисунок 15 – (а) Блок-схема мітки сенсора магнітного поля на основі UHF RFID. (б) Вигляд зверху виготовленого сенсора, що складається з (1) пасивного RFID-чіпа та його антени, (2) збирача потужності та його антени, (3) мікроконтролера, (4) суперконденсатора та (5) сенсора Холла

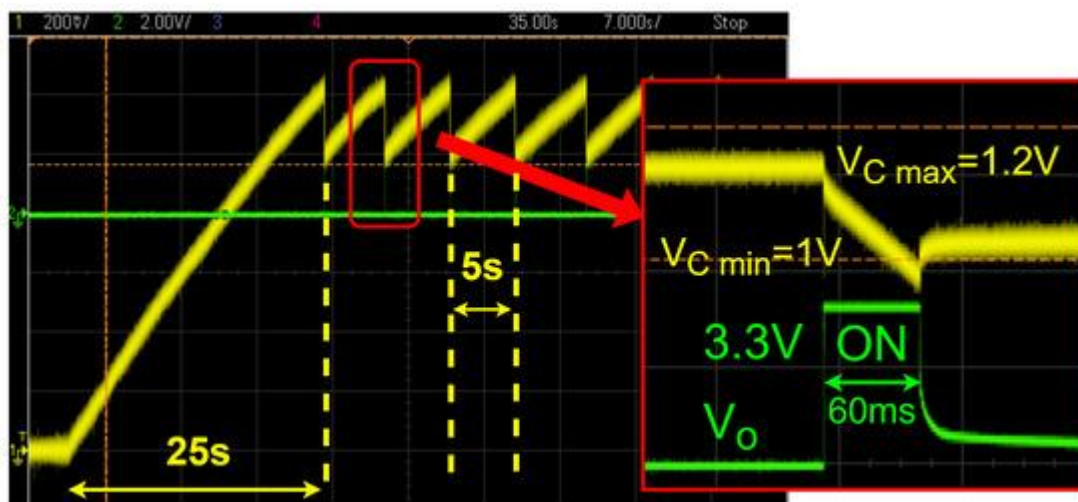


Рисунок 16 – Виміряна напруга зовнішнього конденсатора (жовта лінія) протягом початкового часу заряджання (25 с) та подальшого часу перезаряджання (5 с) після спрацювання сенсора. Вихідна напруга регулятора (зелена лінія) фіксована на 3.33.3V протягом 60 мс, під час яких відбувається вибірка магнітного поля та розряджається зовнішній конденсатор

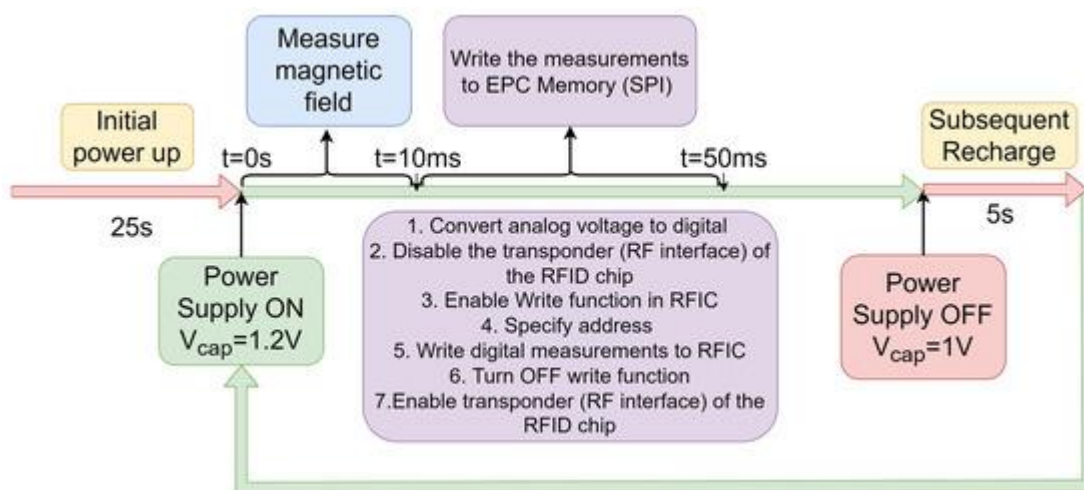


Рисунок 17 – Діаграма часової шкали роботи протягом часового вікна 60 мс, коли вихідний сигнал сенсора Холла зчитується та записується в пам'ять EPC RFID-чіпа. Протягом цього часу транспондер RFID-чіпа вимкнений, що робить його невиявлюваним, доки не буде завершено вимірювання магнітного поля та передачу даних на RFID-чіп

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (БАКАЛАВРСЬКОЇ)
КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**ПАРАМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З
ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Параметричні перетворювачі магнітного поля з частотним виходом для сенсорних мереж»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,54%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Воловик А.Ю. – д.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А.О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Осадчук Я.О. – д.т.н., доцент, каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Лобур О.О.
(прізвище, ініціали)