

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))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ»

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-22м з/в
спеціальності 172 – Телекомунікації
та радіотехніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)



Крапля В.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС



Осадчук Я.О.

(прізвище та ініціали)

« 06 » 06 2024 р.

Опонент: к.т.н., доц. доцент каф. ІКСТ



Семенова О.О.

(прізвище та ініціали)

« 06 » 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 10 » 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«15» березня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Краплі Віталію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем»

керівник роботи к.т.н., доц., доцент кафедри ІРТС Осадчук Я.О.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «11» 03.2024 р. №81.

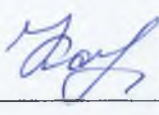
2. Строк подання студентом роботи 06.06.2024р.

3. Вихідні дані до роботи: Напруга живлення від 3,3В – 5В; Струм споживання – 5 -25мА; Робоча частота – 5кГц-5МГц; робоча температура від -20 до +60⁰С.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз існуючого стану сенсорів магнітного поля для IoT систем на основі магніто-механо-електричних (ММЕ) композитних пристроїв для збору енергії та вимірювання магнітного поля. Розробка та дослідження ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку на основі IoT для вимірювань поля ELF. Моніторинг стану активних магнітних підшипників в інтернеті речей. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Механізм роботи магнітомеханоелектричного перетворення. Принципова схема процесу передачі енергії в генераторі ММЕ з МЕ композитами. Принципова схема установки вимірювання генератора ММЕ. Напруженість магнітного поля зменшується зі збільшенням відстані від поля з швидким ($1/r^3$, $1/r^2$) або повільним ($1/r$) спаданням. Блок-схема запропонованого ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку на основі IoT. Принципова електронна схема запропонованого вимірювача магнітної індукції. Вихідна напруга запропонованого RMS детектора є функцією щільності магнітного потоку. Електронна схема запропонованої системи збору енергії ELF і деяких джерел магнітного поля. Типова схема керування АМВ. Моніторинг стану системи АМВ через концепцію IoT.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	доцент каф. ІРТС доцент, к.т.н., Осадчук Я.О.		
Економічна частина	доцент каф. ЕПВМ, доцент, к.е.н., Кавецький В.В.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	професор кафедри БЖДІБ, професор, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 17.03.2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

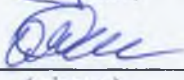
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми МКР	31.01.2024-28.02.2024	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2024-10.03.2024	
3.	Затвердження теми. Розробка завдання на МКР.	11.03.2024-10.04.2024	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	11.04.2024-06.05.2024	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	07.05.2024-11.05.2024	
6.	Розробка графічної частини МКР	12.05.2024-18.05.2024	
7.	Економічна частина	19.05.2024-22.05.2024	
8.	Охорона праці (ОП)	23.05.2024-26.05.2024	
9.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	27.05.2024-31.05.2024	
10.	Нормоконтроль	01.06.2024-03.06.2024	
11.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	04.06.2024-08.06.2024	
12.	Захист МКР ЕК	09.06.2024-11.06.2024	

Студент


(підпис)

Крапля В.М.

Керівник роботи


(підпис)

Осадчук Я.О.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.382

Крапля В.М. Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем: магістерська кваліфікаційна робота – Вінниця: ВНТУ 2024 р. – стор., рис., бібл., табл. – українською мовою.

В магістерській кваліфікаційній роботі проводились дослідження радіовимірювальних сенсорів магнітного поля для IoT систем. Також представлений аналіз сучасного стану пристроїв вимірювання магнітного поля для IoT систем.

У першому розділі описано декілька високоефективних композитних пристроїв ММЕ, що складаються з п'єзоелектричних, магнітострикційних, трибоелектричних і постійних магнітних матеріалів, які були розроблені для збирачів енергії та датчиків магнітного поля для IoT та біомедичних застосувань. Композитні матеріали ММЕ можуть забезпечувати перетворення розсіяних магнітних полів в електричний сигнал і, таким чином, можуть використовуватися як високоефективні генератори енергії або надчутливі магнітні датчики.

В другому розділі представлено дослідження та реалізацію ізотропного лічильника індукції магнітного поля на основі надзвичайно низької частоти (ELF) IoT. Розроблена математична модель ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку. Отримано функцію перетворення сенсора магнітного поля. На основі математичної моделі розроблено прототип схеми сенсора магнітного поля, який може вимірювати щільність магнітного потоку від 100 нТл до 10 мкТл за допомогою 3 квадратних ідентичних сенсорних зондів у вертикальному вирівнюванні, забезпечуючи вимірювання ізотропного поля в площинах X, Y та Z. Запропонований недорогий прилад може вимірювати всі магнітні поля від таких джерел, як трансформатори, електродвигуни, обігрівачі, фени та мережу живлення, а також їх гармонічні частоти. Плата Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 з інтегрованим модулем WiFiNINA відповідає за передачу даних від датчика до хмари, як повне рішення IoT.

У третьому розділі представлені дослідження дистанційного моніторингу стану АМБ. Було запропоновано рішення використовувати готове апаратне забезпечення IoT і спеціальне програмне забезпечення для прив'язки до позиції АМБ і поточних сигналів. Це дозволило техніку OEM дистанційно спостерігати за сигналами. Запропонована стратегія була продемонстрована на випробувальному стенді АМБ. Шлюз Raspberry Pi та програмне забезпечення VNC Server використовувалися для реалізації підключення IoT.

Ключові слова: IoT система; радіовимірювальні сенсори магнітного поля; функція перетворення; композитні матеріали ММЕ.

ABSTRACT

Kraplia V.M. Magnetic field radio measuring sensors for IoT systems: Master's thesis - Vinnytsia: VNTU 2024 - pp., fig., bibl., table. - in the Ukrainian language.

In the master's qualification work, research was carried out on radio measuring sensors of the magnetic field for IoT systems. An analysis of the current state of magnetic field measurement devices for IoT systems is also presented.

In the first section, several high-performance composite MME devices composed of piezoelectric, magnetostrictive, triboelectric, and permanent magnet materials have been developed for energy harvesters and magnetic field sensors for IoT and biomedical applications. Composite MME materials can provide the conversion of scattered magnetic fields into an electrical signal and thus can be used as highly efficient power generators or ultra-sensitive magnetic sensors.

The second section presents the research and implementation of an isotropic magnetic field induction meter based on extremely low frequency (ELF) IoT. A mathematical model of the isotropic magnetic flux density meter was developed. The conversion function of the magnetic field sensor is obtained. Based on the mathematical model, a prototype magnetic field sensor circuit is developed that can measure magnetic flux density from 100 nT to 10 μ T using 3 square identical sensor probes in vertical alignment, providing isotropic field measurements in the X, Y, and Z planes. The proposed low-cost device can measure all magnetic fields from sources such as transformers, electric motors, heaters, hair dryers and the mains, as well as their harmonic frequencies. The Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 board with an integrated WiFiNINA module is responsible for transferring data from the sensor to the cloud as a complete IoT solution.

The third section presents research on remote monitoring of the state of AMB. A solution was proposed to use off-the-shelf IoT hardware and custom software to link to AMB position and current signals. This allowed the OEM technician to observe the signals remotely. The proposed strategy was demonstrated on the AMB test bench. A Raspberry Pi gateway and VNC Server software were used to implement IoT connectivity.

Keywords: IoT system; magnetic field radio measuring sensors; conversion function; MME composite materials.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МАГНІТО-МЕХАНО-ЕЛЕКТРИЧНИХ (ММЕ) КОМПОЗИТНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЗБОРУ ЕНЕРГІЇ ТА ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ	10
1.1 Багатофункціональні властивості магнітоелектричних (МЕ) матеріалів.....	10
1.2 Високоефективні композитні пристрої ММЕ для збору енергії та застосування вимірювання магнітного поля	13
1.3 Вплив коефіцієнтів діелектричних і механічних втрат на збирання ММЕ.....	18
1.4 Вплив текстурування магнітострикційної фази O1 на ефективність зарядки Mme	20
1.5 Вплив концентрації магнітного потоку на ефективність збирання енергії ММЕ	22
1.6 Гібридизація ефектів п'єзоелектричної та електромагнітної індукції на генераторі ММЕ	25
1.7 Магніто-механо-трибоелектричний генератор (ММТЕГ).....	28
1.8 ММТЕГ для оптогенетичної нейромодуляції	30
1.9 Композит ММЕ, чутливий до ультрамагнітного поля, створений завдяки фотонному відпалу спалаху.....	33
1.10 Висновки до розділу.....	37
2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІЗОТРОПНОГО ВИМІРЮВАЧА ЩІЛЬНОСТІ МАГНІТНОГО ПОТОКУ НА ОСНОВІ ІОТ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ПОЛЯ ELF	38
2.1 Математична модель ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку	38
2.2 Розробка підсилювача з підсиленням $G/2\pi f$ та детектора RMS	48
2.3 Електронна схема пропонованого вимірювача щільності магнітного потоку ЕМП	49
2.4 Реалізація ізотропного датчика ELF	53
2.5 Додаток ІоТ з платою Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 для моніторингу поля ELF у реальному часі.....	56
2.6 Збір енергії магнітного поля (MF-EH) від роботи електричних пристроїв комерційного використання	57
2.7 Експериментальні дослідження MF-EH.....	60
2.8 Висновки до розділу.....	61
3 МОНІТОРИНГ СТАНУ АКТИВНИХ МАГНІТНИХ ПІДШИПНИКІВ В ІНТЕРНЕТІ РЕЧЕЙ	63
3.1 Активні магнітні підшипники	63
3.2 АМВ і моніторинг стану в ІоТ	66

3.3	Експериментальна система.....	68
3.4	Тестування розробленої системи.....	73
3.5	Висновки до розділу.....	79
4	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	81
4.1	Оцінювання наукового ефекту.....	81
4.2	Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	85
4.3	Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	98
4.4	Висновок до розділу.....	99
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	100
5.1	Технічні рішення з безпечного виконання дослідження.....	100
5.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	103
5.3	Розрахунок надлишкового тиску вибуху для пилоповітряної суміші.....	109
	ВИСНОВКИ.....	114
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	116
	Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	122
	Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи.....	131

ВСТУП

Актуальність. В останні роки відбуваються швидкі зміни у інформаційних технологіях, промисловості та соціальних застосунках. Практично всі галузі промисловості перейшли до автоматизації, а людське втручання дуже зменшилося, що привело до революції в галузях, названої четвертою промисловою революцією. Датчики Інтернету речей (IoT) відіграватимуть ключову роль в епоху 4-ї промислової революції для збору інформації, аналізу цієї інформації та виконання дій, щоб активувати тісно пов'язані автоматичні системи, пов'язані з громадською безпекою, охороною здоров'я, промисловим виробництвом та навколишнім середовищем. моніторинг. Тим не менш, практичне використання систем Інтернету речей, включаючи багатофункціональні датчики, схеми керування та реєстратори даних, у будь-якому місці значно обмежене через труднощі із забезпеченням відповідної електроенергії. Наприклад, вбудовування батарей з обмеженою ємністю в мільярди майбутніх датчиків Інтернету речей може бути неможливим через величезну потребу в робочій силі, а також через економічні витрати на обслуговування бездротових електронних систем. У цьому відношенні пристрої перетворення ММЕ можуть використовуватися як збирачі енергії для реалізації автономних, стійких і не потребуючих обслуговування додатків IoT. Генератори ММЕ на основі розсіяних магнітних полів є перспективним кандидатом для демонстрації автономних систем IoT, оскільки генератори ММЕ можуть безперервно перетворювати електричну енергію від розсіяних магнітних полів змінного струму (змінного струму (змінного струму)) (зазвичай менше 10 Oe) на фіксованій частоті 50 або 60 Гц, індукований повсюдно встановленими комерційними силовими кабелями, такими як лінії електропередачі, а також кабелі на заводах, у будівлях та різних інших інфраструктурах.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є покращення параметрів радіовимірювального сенсора магнітного поля для IoT систем, технологічно сумісного з сучасною мікро- та нанoeлектронною елементною базою, принцип роботи якого базується на використанні композитного матеріалу ММЕ, що надає можливість створення та виготовлення конкурентноспроможних зразків пристрої перетворення та генераторів для IoT систем.

Об'єктом дослідження є процес перетворення магнітного поля у частотний сигнал в радіовимірювальних пристроях для IoT систем.

Предметом дослідження – статичні і динамічні характеристики радіовимірювальних сенсорів магнітного поля для IoT систем.

Поставлена мета у магістерській кваліфікаційній роботі розв'язуються на основі таких *задач*:

- проаналізувати існуючі пристрої Інтернет речей (IoT) і бездротових сенсорних мереж (WSN) та обґрунтувати переваги пристроїв перетворення ММЕ, які можуть використовуватися як збирачі енергії для реалізації автономних, стійких і не потребуючих обслуговування додатків IoT по відношенню до існуючих;
- розробити математичну модель ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку;
- отримати функцію перетворення сенсора магнітного поля;
- розробити прототип схеми сенсора магнітного поля, який може вимірювати щільність магнітного потоку від 100 нТл до 10 мкТл;
- дослідити дистанційний моніторинг стану АМБ.
- розробити апаратне забезпечення IoT і спеціальне програмне забезпечення для прив'язки до позиції АМБ і поточних сигналів.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні:

- рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей радіовимірювальних сенсорів магнітного поля для IoT систем;
- основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функції перетворення;
- диференціального та інтегрального числення для створення математичної моделі ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Розроблена математична модель ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку.

2. Отримано функцію перетворення сенсора магнітного поля.

3. На основі математичної моделі розроблено прототип схеми сенсора магнітного поля, який може вимірювати щільність магнітного потоку від 100 нТл до 10 мкТл за допомогою 3 квадратних ідентичних сенсорних зондів у вертикальному вирівнюванні, забезпечуючи вимірювання ізотропного поля в площинах X, Y та Z. Лічильник має плоску характеристику в робочому діапазоні частот від 40 Гц до 10 кГц.

4. Досліджено дистанційний моніторинг стану АМБ. Було запропоновано рішення використовувати готове апаратне забезпечення IoT і спеціальне програмне забезпечення для прив'язки до позиції АМБ і поточних сигналів. Це дозволило техніку OEM дистанційно спостерігати за сигналами. Запропонована стратегія була продемонстрована на випробувальному стенді АМБ. Шлюз Raspberry Pi та програмне забезпечення VNC Server використовувалися для реалізації підключення IoT.

Практичне значення одержаних результатів

1. У результаті математичного моделювання отримані аналітичні вирази, які можуть бути використаними для інженерного розрахунку основних параметрів радіовимірювального сенсора магнітного поля для IoT систем.

2. Запропонований недорогий прилад який може вимірювати всі магнітні поля від таких джерел, як трансформатори, електродвигуни, обігрівачі, фени та мережу живлення, а також їх гармонічні частоти. Плата Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 з інтегрованим модулем WiFiNINA відповідає за передачу даних від датчика до хмари, як повне рішення IoT. Виміряне магнітне поле можна відобразити на будь-якому мобільному пристрої з підключенням Wi-Fi, що підтримується програмою Blynk через операційні системи Android та iOS або веб-інтерфейс. Крім того, функція Arduino FFT також може відобразити виміряну напруженість магнітного поля в межах його гармонійних частот у майбутній покращеній реалізації. Наявність магнітних полів у міських і напівміських районах може бути використана як аварійне резервне джерело енергії для живлення електронних пристроїв з низьким споживанням, таких як датчики Інтернету речей (IoT).

5. Розроблено шлюз Raspberry Pi та програмне забезпечення VNC Server які використовувалися для реалізації підключення IoT. Існує кілька перспективних напрямків подальшого розвитку АМВ та IoT. По-перше, слід розглянути кібербезпеку. Іншими словами, необхідно розробити механізми, які гарантуватимуть, що лише призначені користувачі зможуть увійти в систему та отримати доступ до даних АМВ. Крім того, можна розробити мобільний додаток, за допомогою якого користувачі АМВ зможуть перевіряти стан системи з довільних місць. Більш складним є потенційне вдосконалення схеми IoT для використання в режимі реального часу. Двома можливими рішеннями є операційна система реального часу для шлюзу IoT і використання програмованого блоку реального часу, що збільшить вартість обладнання. Виконання в режимі реального часу призведе до наступного етапу розвитку, кіберфізичної системи, тоді фахівець з обслуговування OEM зможе не тільки контролювати стан системи АМВ і діагностувати проблеми, але й зможе виправляти проблеми, змінюючи закон керування.

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

Структура і обсяг роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МАГНІТО-МЕХАНО- ЕЛЕКТРИЧНИХ (ММЕ) КОМПОЗИТНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЗБОРУ ЕНЕРГІЇ ТА ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Магніто-механо-електричні (ММЕ) композитні пристрої використовувалися для збору енергії та вимірювання магнітного поля завдяки їхнім перевагам, включаючи високу продуктивність, просту структуру та стабільні властивості. Нещодавно розроблені пристрої ММЕ можуть перетворювати розсіяні магнітні поля в електричні сигнали, таким чином генеруючи вихідну потужність понад 50 мВт і виявляючи надмалі магнітні поля нижче рТ. Ці притаманні видатні властивості пристроїв ММЕ можуть уможливити розробку не лише накопичувачів енергії з автономним живленням для систем Інтернету речей (IoT), але й надчутливих датчиків магнітного поля для діагностики біомагнетизму людини чи інших. Цей розділ містить короткий огляд нещодавно зареєстрованих високопродуктивних пристроїв ММЕ для збору енергії та застосування магнітного зондування.

1.1 Багатофункціональні властивості магнітоелектричних (МЕ) матеріалів

Багатофункціональні властивості магнітоелектричних (МЕ) матеріалів можуть уможливити демонстрацію нових електронних пристроїв для збору енергії та застосування магнітного зондування. У МЕ-матеріалах виникають явища зв'язку між магнітними та електричними властивостями, які полегшують маніпуляцію поляризацією діелектрика за допомогою магнітного поля та контроль намагніченості за допомогою електричного поля [1]. Однофазні МЕ матеріали є ізотропними сполуками та хімічно однорідними з властивим МЕ ефектом зв'язку на додаток до співіснування впорядкованих електричних диполів великої дії та магнітних моментів [2]. Незважаючи на те, що зв'язок між полярними та магнітними підґратками в одній МЕ-фазі був би ідеальним для різних застосувань, більшість однофазних матеріалів показали слабкі характеристики МЕ-зв'язку при кімнатній температурі через взаємне виключення сегнетоелектрики та феромагнетизму при кімнатній температурі [3].

МЕ композити складаються з фізично розділених матеріалів електричного та магнітного порядку, які демонструють ефективність зв'язку

МЕ на порядки більшу, ніж однофазні МЕ матеріали при кімнатній температурі [4]. Робочі механізми МЕ-композитів в основному описані як (I) магніто-механо-електричне (ММЕ) перетворення на основі механічної деформації, (II) спіновий обмін і (III) носій заряду [5]. Серед них перетворення ММЕ, кероване механічною деформацією, яке є предметом цього огляду, в основному досліджувалося багатьма дослідницькими групами, тоді як дослідження двох інших робочих механізмів все ще знаходяться на ранніх стадіях розробки.

Композитні пристрої ММЕ були досліджені на основі комбінацій різних принципів перетворення енергії, таких як п'єзoeлектричні, трибоелектричні та магнітострикційні ефекти [6, 7]. Коли зовнішнє магнітне поле прикладається до пристрою ММЕ, механічна деформація або вібрація, індукована магнітострикційним або магнітним матеріалом, доставляється в п'єзoeлектричний або трибоелектричний матеріал, що призводить до генерації електричного потенціалу та зарядів, як показано на рисунку 1 [8]. Активно повідомлялося про використання пристроїв ММЕ для збору енергії та застосування магнітного поля через їхні переваги (наприклад, перетворення енергії, вихідний сигнал, малий розмір і стабільні властивості) [9, 10].



Рисунок 1.1 – Механізм роботи магнітомеханоелектричного перетворення

Датчики Інтернету речей (IoT) відіграватимуть ключову роль в епоху 4-ї промислової революції для збору інформації, аналізу цієї інформації та виконання дій, щоб активувати тісно пов'язані автоматичні системи, пов'язані з громадською безпекою, охороною здоров'я, промисловим виробництвом та навколишнім середовищем. моніторинг [11, 12]. Тим не менш, практичне використання систем Інтернету речей, включаючи багатофункціональні датчики, схеми керування та реєстратори даних, у будь-якому місці значно обмежене через труднощі із забезпеченням відповідної електроенергії [13]. Наприклад, вбудовування батарей з обмеженою ємністю в мільярди майбутніх датчиків Інтернету речей може бути неможливим через величезну потребу в робочій силі, а також через економічні витрати на обслуговування бездротових електронних систем

[14]. У цьому відношенні пристрої перетворення ММЕ можуть використовуватися як збирачі енергії для реалізації автономних, стійких і не потребуючих обслуговування додатків IoT [15]. Генератори ММЕ на основі розсіяних магнітних полів є перспективним кандидатом для демонстрації автономних систем IoT, оскільки генератори ММЕ можуть безперервно перетворювати електричну енергію від розсіяних магнітних полів змінного струму (змінного струму (змінного струму)) (зазвичай менше 10 Ое) на фіксованій частоті 50 або 60 Гц, індукований повсюдно встановленими комерційними силовими кабелями, такими як лінії електропередачі, а також кабелі на заводах, у будівлях та різних інших інфраструктурах [6].

З іншого боку, надчутливі датчики магнітного поля, які дозволяють виявляти на рівні суб-рТ, привернули увагу для біомедичних магнітних застосувань, таких як магнітокардіографія (MCG) і магнітоенцефалографія (MEG), для діагностики медичних захворювань, пов'язаних з людиною. серце і мозок [16]. Живі органи зазвичай генерують дуже мале магнітне поле змінного струму нижче 10 рТ (наприклад, 10 рТ на серці, 10 fТ на нервовій системі та 100 fТ на мозку) з відносно низьким діапазоном частот до 1 кГц [17 , 18]. Сучасні надчутливі магнітометри, які дозволяють детектувати суб-рТ-діапазон, в основному базуються на надпровідних квантових інтерференційних пристроях (СКВІД) із надпровідними петлями, що містять джозефсонівські переходи [19]. Однак система SQUID неминуче потребує охолоджувача з рідким гелієм для кріогенної надпровідності, що збільшує обсяг SQUID і вартість його виробництва, таким чином значно обмежуючи розширення SQUID для загального клінічного використання [20]. Різні дослідницькі групи в світі досліджували композитні датчики ММЕ, оскільки вони представляють потенціал для виявлення наднизького магнітного поля рТ-діапазону завдяки своїй надзвичайній магнітній чутливості при кімнатній температурі з перевагами, включаючи їх просту структуру, низьку вартість і високу магнітну спрямованість. [21].

У цьому документі наведено короткий огляд нещодавнього прогресу, досягнутого нашими дослідницькими групами в області композитних пристроїв ММЕ для збору енергії та застосування магнітного зондування. Зокрема, високоефективні генератори та датчики ММЕ на основі різноманітних сучасних матеріалів і структур пристроїв, таких як анізотропний п'єзоелектричний монокристал $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ (PMN-PZT), обговорюються текстурований магнітострикційний сплав Fe-Ga, наноструктуровані трибоелектричні полімерні плівки, концентратор магнітного поля, гібридизована структура множинного перетворення енергії тощо.

1.2 Високоєфективні композитні пристрої ММЕ для збору енергії та застосування вимірювання магнітного поля

У даному підрозділі детально пояснюється принцип роботи традиційного композитного генератора ММЕ, що складається з п'єзоелектричних і магнітострикційних матеріалів. Генератор ММЕ, розміщений у місці, де діє зовнішнє магнітне поле, викликає деформацію в магнітострикційному шарі за допомогою ефекту магнітострикції (магніто-механічний зв'язок), і деформація передається на п'єзоелектричний шар, що призводить до електричного зміщення або діелектричної поляризації прямим п'єзоелектриком. ефект (механоелектричний зв'язок) [3]. Процес послідовної взаємодії генератора ММЕ показаний на рисунку 1.2а. П'єзоелектричні матеріали, що використовуються для генераторів ММЕ в конструкціях консольного типу, повинні мати високий поперечний п'єзоелектричний ефект для досягнення вищої щільності потужності, і цього можна досягти шляхом полюсування (електричним шляхом) цих матеріалів у напрямку товщини через згинальний рух, що є результатом п'єзоелектричного ефекту (режим d_{31} або d_{32}). Позначення п'єзоелектричного заряду/коефіцієнта деформації d_{ij} у кристалографічній орієнтації можна зрозуміти зі стандарту IEEE.

Монокристалічні п'єзоелектричні матеріали демонструють відмінну п'єзоелектричну реакцію завдяки рівномірному вирівнюванню диполів. Монокристал $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ – PbTiO_3 (PMN–PT) і PMN–PZT є добре відомими релаксорними п'єзоелектричними матеріалами, які демонструють високу d_{33} (>2000 пКл/Н) і високу коефіцієнт електромеханічного зв'язку k_{33} ($>92\%$) в орієнтаціях $\langle 001 \rangle$ з ромбоєдричною структурою поблизу морфотропної межі фаз (MPB) [22]. Покращені п'єзоелектричні відгуки ромбоєдричних кристалів з орієнтацією $\langle 001 \rangle$ пояснюються їхньою п'єзоелектричною анізотропією та сконструйованими доменними станами, які дозволяють обертати поляризацію $\langle 111 \rangle$ у напрямку $\langle 001 \rangle$ [23, 24]. Поліпшення п'єзоелектричних властивостей цих монокристалів сильно залежить від складу MPB, кристалографічної орієнтації та обертання поляризації [25]. Ці знахідки свідчать про те, що виготовлення МЕ-композитів із особливо орієнтованими монокристалами є хорошим підходом для максимізації МЕ-зв'язку [26].

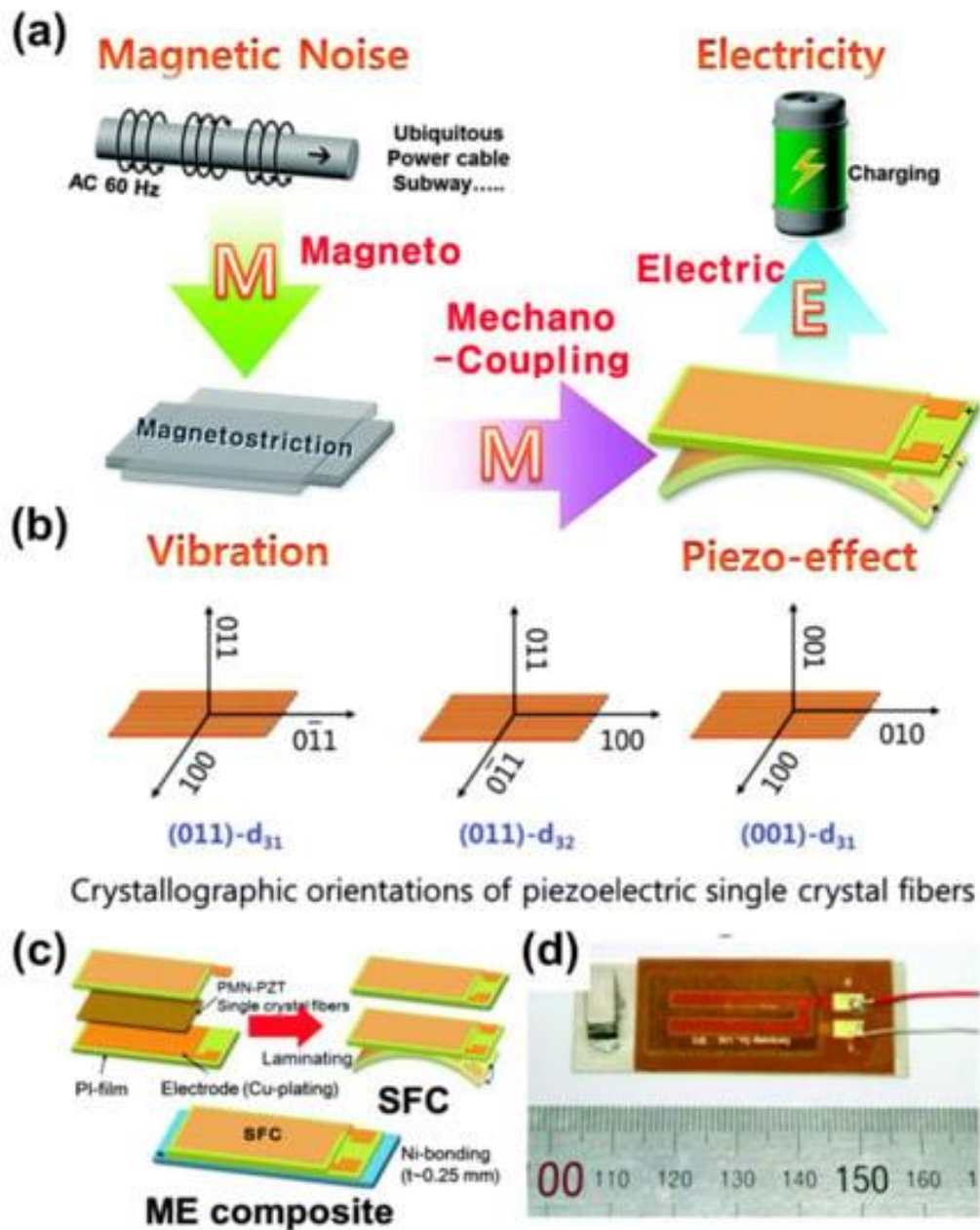


Рисунок 1.2 – (а) Принципова схема процесу передачі енергії в генераторі ММЕ з МЕ композитами. (б) Схематична діаграма кристалографічних орієнтацій п'єзоелектричних монокристалічних волокон, що використовуються в МЕ композитах. (с) Схематична діаграма етапів виготовлення композиту МЕ (д) Фотокопія розробленого генератора ММЕ з підтвердженням маси Nd

Базуючись на цій концепції, R_{yu} виготовив високопродуктивний генератор ММЕ, вбудований у п'єзоелектричний монокристал PMN-PZT, використовуючи п'єзоелектричну моду d_{32} [6]. Для виготовлення генераторів ММЕ використовуються різні методи синтезу. Для вирощування п'єзоелектричного монокристала PMN-PZT з ромбоєдричною фазою

використано метод вирощування монокристалів у твердому стані. Токсичний металевий свинець (Pb) є небезпечним для здоров'я людини та неекологічно чистим, особливо враховуючи цю проблему щодо застосування датчиків IoT у моніторингу навколишнього середовища, біомедичній галузі тощо [27]. Ці монокристали PMN-PZT обмежені у своєму практичному застосуванні через їхню жорсткість і крихкість. Щоб уникнути цієї проблеми, високоефективний гнучкий п'єзоелектричний монокристалічний волоконний композит (SFC) був виготовлений для генераторів ММЕ, як показано на рисунку 1.2b. Для виготовлення ламінатів ME SFC був скріплений високочистою магнітострикційною пластиною Ni за допомогою епоксидної смоли термічного затвердіння. Структура кантилеверного типу вважається перспективною для генераторів ММЕ на низьких частотах завдяки своїй простій конструкції, гнучкості, можливості налаштування її резонансної частоти та вищій передачі деформації. Таким чином, генератор ММЕ з консольною структурою був розроблений з п'єзоелектричним SFC, магнітострикційною пластиною Ni та магнітним доказом маси Nd, як показано на рисунку 1.2 c, d. Nd-магніти створюють магнітний крутний момент у консольній структурі за годинниковою стрілкою та проти годинникової стрілки під дією змінного магнітного поля, що може максимізувати механічну вібрацію консольної балки під час роботи ММЕ. Магніт, як показано на рисунку 1.3, може генерувати висхідне магнітне поле ($B_{\text{магніт}}$), і можна припустити, що віртуальна петля струму ($I_{\text{петля}}$) тече в напрямку проти годинникової стрілки в магніті маси. Коли зовнішнє магнітне поле змінного струму (B_{external}) індукується справа наліво, сили (F) протилежного напрямку можуть бути застосовані до двох сторін магніту маси згідно з правилом лівої руки Флемінга. Створені протилежні сили на двох сторонах довжини масового магніту здійснюють рух крутного моменту проти годинникової стрілки, що може призвести до механічного руху консольної конструкції вгору. Тим часом напрямок зовнішнього магнітного поля змінного струму змінюється зліва на право, що може створити механічний крутний момент за годинниковою стрілкою від магніту. У результаті зовнішнє магнітне поле змінного струму забезпечує повторювані вгору та вниз механічні згинальні коливання консольної балки.

У 2015 році було повідомлено про продуктивність збирання енергії найпершим генератором ММЕ. У цьому звіті ММЕ з консольною структурою перевіряється на резонансній частоті за відсутності магнітного поля постійного струму (DC). Крім того, він перевіряється в присутності магнітного поля змінного струму (160 мкТл при резонансній частоті 60 Гц), створюваного котушками Гельмгольца, як показано на рисунку 1.4a.

Виявлено, що генеровані напруги є сигналами напруги від піку до піку (V_{pp}) 6,5, 3,4 та 9,5 В для $\langle 001 \rangle$ - d_{31} , $\langle 011 \rangle$ - d_{31} та $\langle 011 \rangle$ - d_{32} відповідно (Рисунок 1.4 b). Анізотропний $\langle 011 \rangle$ SFC з режимом d_{32} має набагато вищу ефективність генерування енергії, ніж режими $\langle 001 \rangle$ - d_{31} і $\langle 011 \rangle$ - d_{31} .

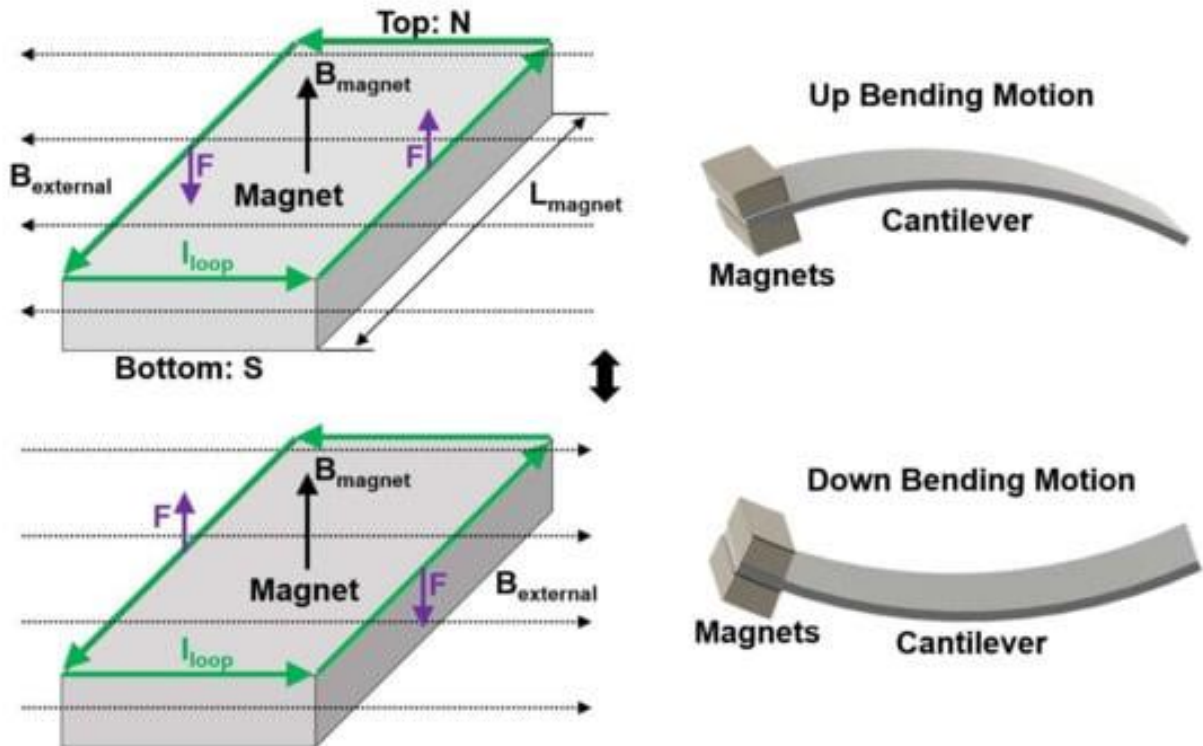


Рисунок 1.3 – Схема механізму механічної вібрації на кантилевері ММЕ з поворотом проти годинникової стрілки та за годинниковою стрілкою на масових магнітах під впливом зовнішнього змінного магнітного поля

На рисунку 1.4, в показано випрямлену та заряджену напругу в конденсаторі 10 мкФ як функцію опору навантаження. $\langle 011 \rangle$ SFC з режимом d_{32} демонструє більшу характеристику напруги, ніж інші режими. $\langle 011 \rangle$ SFC з режимом d_{32} демонструє майже триразове підвищення (-1850 пКл/Н) порівняно з $\langle 011 \rangle$ - d_{31} SFC (599 пКл/Н). Крім того, генератор ММЕ на основі $\langle 011 \rangle$ - d_{32} SFC із прикладеним магнітним полем 500 мкТл при 60 Гц увімкнув 35 світлодіодів високої інтенсивності (рис. 1.4 d). Результати $\langle 011 \rangle$ - d_{32} PMN-PZT п'єзоелектричного генератора ММЕ на основі SFC є можливим як повсюдне джерело живлення для портативних електричних пристроїв малої потужності (бездротових сенсорних мереж і систем бездротової зарядки) шляхом збору енергії з життєвого середовища.

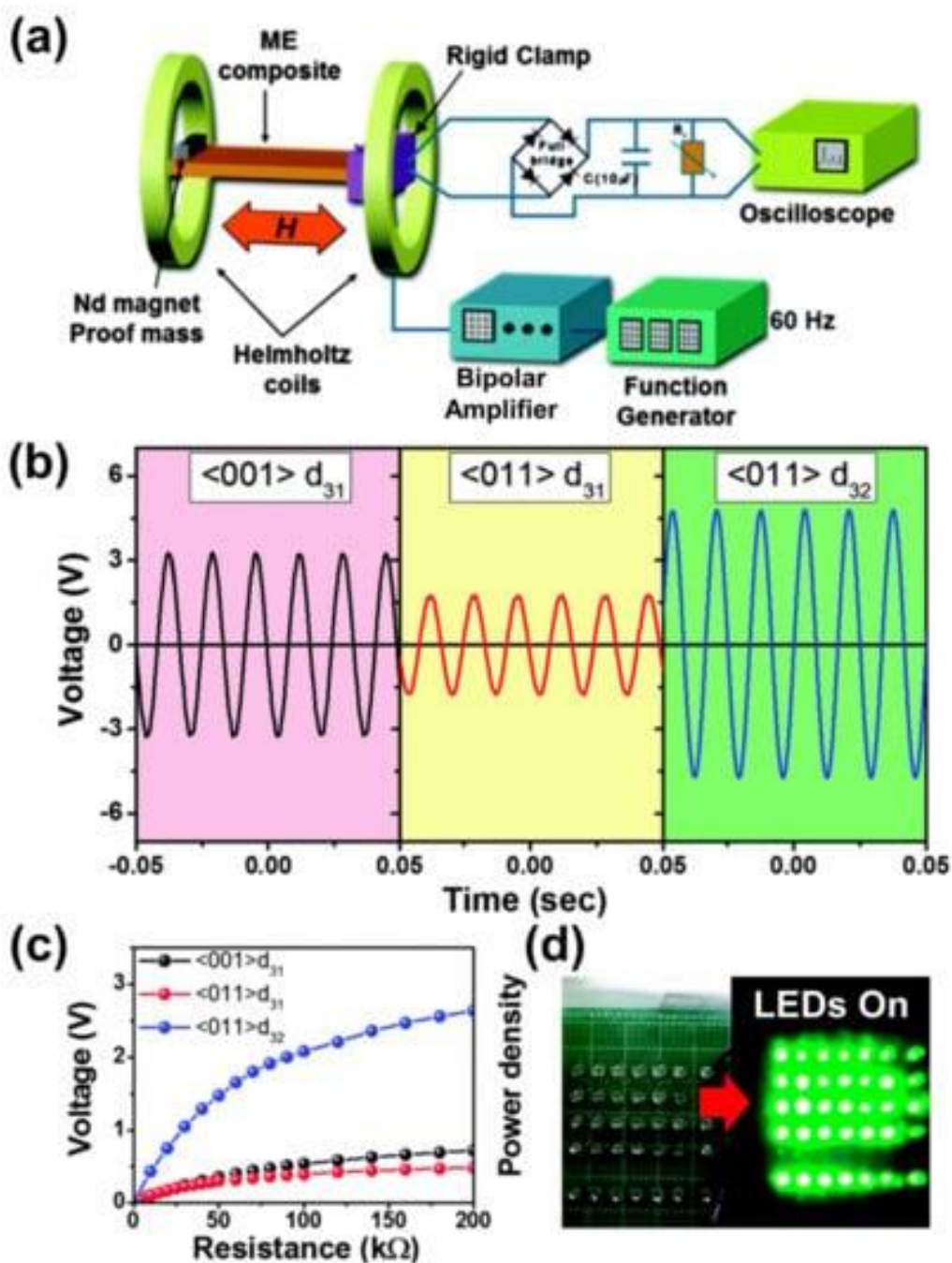


Рисунок 1.4 – (а) Принципова схема установки вимірювання генератора ММЕ. (б) Відгук вихідної напруги від генератора ММЕ з вбудованим $\langle 011 \rangle$ SFC у режимі d_{32} при 160 мкТ і 60 Гц. (с) Випрямлена напруга як функція опору навантаження для різних орієнтацій з модами. (д) Фотографія 35 світлодіодів із частотою вмикання/вимкнення 1 Гц за допомогою потужності, отриманої від генератора ММЕ

1.3 Вплив коефіцієнтів діелектричних і механічних втрат на збирання ММЕ

Було розроблено різноманітні показники добротності (FOMs), щоб акцентувати увагу на виборі п'єзоелектричних матеріалів для застосувань збору енергії. Формули FOM продуктивності збирання в п'єзоелектричних енергетичних комбайнах задаються наступними рівняннями [6]

$$FOM = d_{ij} \times g_{ij} \quad (1.1)$$

$$FOM_{ij} = \frac{d_{ij}^2}{\epsilon_{ij}^T} \quad (1.2)$$

де d_{ij} — коефіцієнт п'єзоелектричного заряду, g_{ij} — коефіцієнт п'єзоелектричної напруги, а ϵ_{ij} — діелектрична проникність за прикладеної напруги T . Однак попередні дослідження показали, що FOMs не пояснюють належним чином вихідні характеристики цих енергозбиральних пристроїв через нелінійна поведінка п'єзоелектричних матеріалів. Їхня нелінійна поведінка пов'язана з діелектричними та механічними втратами, що призводить до погіршення продуктивності енергетичного комбайна [24]. Щоб подолати цю проблему, багато дослідницьких груп зосередилися на п'єзоелектричних монокристалах з низькими втратами для підвищення ефективності збору енергії для генераторів ММЕ [8]. Генератори ММЕ, вбудовані в різні п'єзоелектричні монокристали, такі як PMN-PZT з високими втратами, PMN-PZT із середніми втратами та PMN-PZT з низькими втратами, були виготовлені та розроблені [8]. Методи виготовлення цих генераторів ММЕ подібні до описаних вище. На рисунку 1.5а показана характеристика напруги як функція часу для різних генераторів ММЕ, перевірена в змінному магнітному полі 700 мкТл при 60 Гц. Генератор PMN-PZT ММЕ з низькими втратами має вищий максимум V_{pp} 94 В, ніж генератори з великими втратами ($V_{pp} = 30$ В) і середніми втратами ($V_{pp} = 42$ В). Така поведінка пояснюється тим фактом, що магнітоелектричний відгук пристрою залежить від напруги збирання, як показано на рисунку 1.5b. Таким чином, генератор ММЕ, вбудований у PMN-PZT з низькими втратами, має вищу продуктивність збирання врожаю порівняно з двома іншими генераторами.

На основі цієї концепції побудована електронна схема з автономним живленням для зарядки акумулятора мобільного телефону. Система складається з генератора ММЕ, мостового двополуперіодного випрямляча,

суперконденсатора та перетворювача постійного струму, як показано на рисунку 1.5 с. Суперконденсатор ємністю 2,2 мФ був повністю заряджений ($V_{\max} = 20$ В і $E_{\max} = 440$ мДж) протягом 7 хв за допомогою генератора PMN-PZT ММЕ з малими втратами, тоді як генератори PMN-PZT ММЕ з високими втратами та середніми втратами заряджають конденсатор до 14 і 17 В ($E_{\max} = 215$ і 318 мДж), відповідно, як показано на рисунку 1.5 d. Ефективність збору енергії генератором ММЕ значно покращилася за допомогою SCF PMN-PZT із низькими втратами завдяки зменшенню втрат енергії під час перетворення енергії. Крім того, п'єзоелектричний матеріал із низькими втратами відіграє ключову роль у ефективному виробництві електроенергії. Ці результати підтвердили, що система електронної схеми з автономним живленням може накопичувати електричну енергію від генератора ММЕ і здатна заряджати батарею мобільного телефону (рис. 1.5 e), вмикати світлодіоди високої інтенсивності, а також запускати електричний двигун вентилятора без застосування будь-яких зовнішніх джерел.

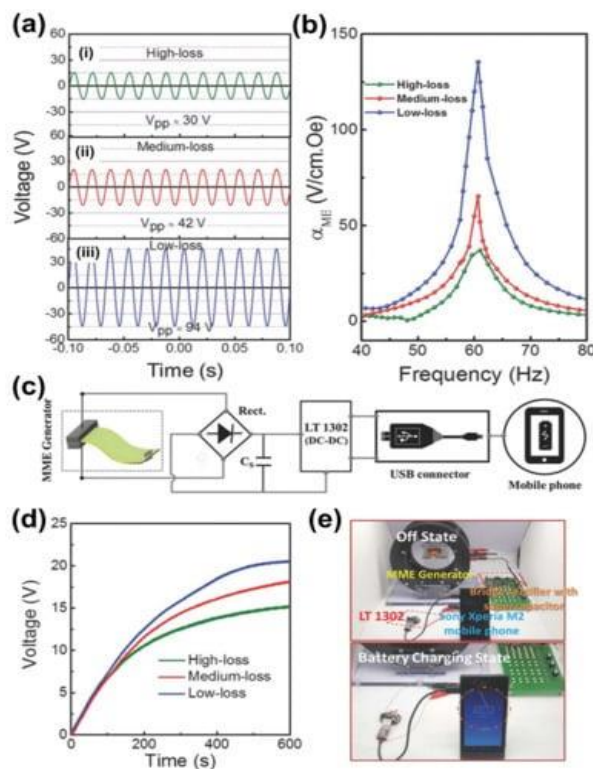


Рисунок 1.5 – (а) Напряга, згенерована сигналами від генераторів ММЕ з високими, середніми та низькими втратами. (б) МЕ коефіцієнт напруги (α_{ME}) як функція керуючої частоти НАС для різних генераторів ММЕ. (с) Принципова схема електричної системи автономного живлення для зарядки акумулятора мобільного телефону за допомогою генератора ММЕ. (d) Відповідь на зарядку в суперконденсаторі 2,2 мФ для різних генераторів. (е) Вимкнено та увімкнено стан заряджання акумулятора телефону

1.4 Вплив текстурування магнітострикційної фази O1 на ефективність зарядки MME

П'єзоелектричні монокристалічні та вбудовані в магнітострикційний шар Ni генератори MME демонструють електричну вихідну потужність порядку ста мкВт у слабкому магнітному полі [6, 8, 24]. Продуктивність генераторів MME покращується завдяки високому анізотропному п'єзоелектричному відгуку (режим d_{32}) SFC. Однак вихідна потужність генератора MME була обмежена магнітострикційним шаром Ni через його відносно низький п'єземагнітний коефіцієнт. Щоб вирішити цю проблему, у композитах MME можна використовувати текстуровані магнітострикційні матеріали для покращення продуктивності збирання. Терфенол-D (хімічна формула: $Tb_{0,3} Dy_{0,7} Fe_2$) є добре відомим магнітострикційним матеріалом, який демонструє більшу магнітострикцію ~ 2000 ppm в магнітному полі 1 кЕ при кімнатній температурі [25]. Тим не менш, присутність критично важливого рідкоземельного елемента (Tb), його крихка природа та високе магнітне поле зсуву для оптимальної роботи перешкодили використанню Terfenol-D у композитах MME. Сплав Fe-Ga з видатною властивістю магнітострикції та низькою вартістю виробництва демонструє більшу магнітострикцію ~ 400 ppm уздовж $\langle 100 \rangle$ напрямку в низькому магнітному полі ~ 200 Oe, що корисно для роботи пристроїв MME в низькому магнітному полі. [26].

Текстурований магнітострикційний сплав Fe-Ga в композитах MME демонструє чудові магнітострикційні властивості [27]. Сплав Fe-Ga з хорошою пластичністю та магнітомеханічним зв'язком був синтезований у тонкі листи за допомогою технології термомеханічної обробки з багатоступеневим процесом прокатки та відпалу (рис. 1.6 (ai)). Процес виготовлення генератора MME, що містить лист зі сплаву Fe-Ga $\langle 100 \rangle$ та ізотропний п'єзоелектрик PMN-PZT SFC, легований Mn, зображено на рисунку 1.6 (aii). Консольно структурований генератор MME був розроблений з використанням легованого Mn п'єзоелектричного SFC PMN-PZT і $\langle 100 \rangle$ текстурованого магнітострикційного Fe-Ga листа з Nd магнітною пробною масою. Текстурований генератор MME на основі Fe-Ga демонструє максимальну вихідну напругу V_{PP} 100 В при резонансній частоті 100 Гц і α_{ME} 1330 В/см·Ое порівняно зі звичайним генератором MME на основі Ni (V_{PP} 59 В і α_{ME} 781 В/см·Е), як показано на рисунку 6 b,c. Генератори MME консольного типу зазвичай мають дуже вузький діапазон робочих частот (смугу пропускання), оскільки він має фіксовану резонансну частоту, яка визначається матеріалами, розміром пристрою, масою магніту тощо [26]. Значення α_{ME} помітно знизилося до ~ 1200 В/см·Ое при

$\sim 99,5/\sim 100,5$ Гц і ~ 1000 В/см $\cdot$ Ое при $\sim 99/\sim 101$ Гц. Таким чином, композитний пристрій ММЕ може генерувати максимальну вихідну продуктивність на певній резонансній частоті. Зараз багато дослідницьких груп досліджують широкосмгові композитні генератори ММЕ з рухомою пробною масою, яка може автоматично переміщувати положення пробної маси для детального регулювання механічної резонансної частоти генератора ММЕ відповідно до частоти зовнішнього змінного магнітного поля. Сигнал змінного струму, створений генератором ММЕ на основі Fe-Ga, перетворюється на сигнал постійного струму для демонстрації роботи електронних пристроїв з автономним живленням. Чотири діоди зазвичай використовуються для побудови двополухвильової мостової схеми випрямлення. Випрямлена напруга насичується ($V_{DC} = 76,5$ В) при 10 МОм, тоді як випрямлений струм зменшується від струму короткого замикання ($I_{DC} = 178$ мкА) з опором навантаження (рис. 1.6 (di)). Максимальна вихідна потужність постійного струму 3,86 мВт і відповідна щільність потужності 3,22 мВт/см³ отримані при опорі навантаження 575 кОм, як показано на рисунку 1.6.(dii). Вихідна потужність змінного струму композиту ММЕ становила 4,6 мВт, яка була зменшена до 3,86 мВт після процесу випрямлення. Таким чином, ККД випрямлення AC-DC в даній роботі склав 83,9%. Генерація високої вихідної енергії в даній структурі зумовлена зв'язком між сильною анізотропною реакцією п'єзоелектричного SCF і високотекстурованого магнітострикційного сплаву Fe-Ga. Реакція збору енергії текстурованого генератора ММЕ на основі Fe-Ga набагато вища порівняно з генераторами ММЕ на основі Ni/PMN-PZT і Ni/PMN-PZT, про які повідомлялося раніше [6].

На основі вищезазначеної концепції побудована автономна бездротова сенсорна система, яка складається з текстурованого Fe-Ga вбудованого генератора ММЕ, накопичувального конденсатора (2,2 мФ), схеми керування живленням, моніторингу ПК та сенсорного модуля, який використовується для запису даних і режими передачі, як показано на [рисунку 6](#) е. Цей генератор ММЕ заряджає конденсатор до 3 В за 25 с і керує бездротовим датчиком для запису та передачі даних ([рис. 6](#) f). Бездротова сенсорна система з автономним живленням, яка може накопичувати електричну енергію від текстурованого вбудованого генератора ММЕ Fe-Ga, здатна забезпечувати достатню кількість автономної енергії для роботи системи бездротової сенсорної мережі без застосування будь-якого джерела живлення.

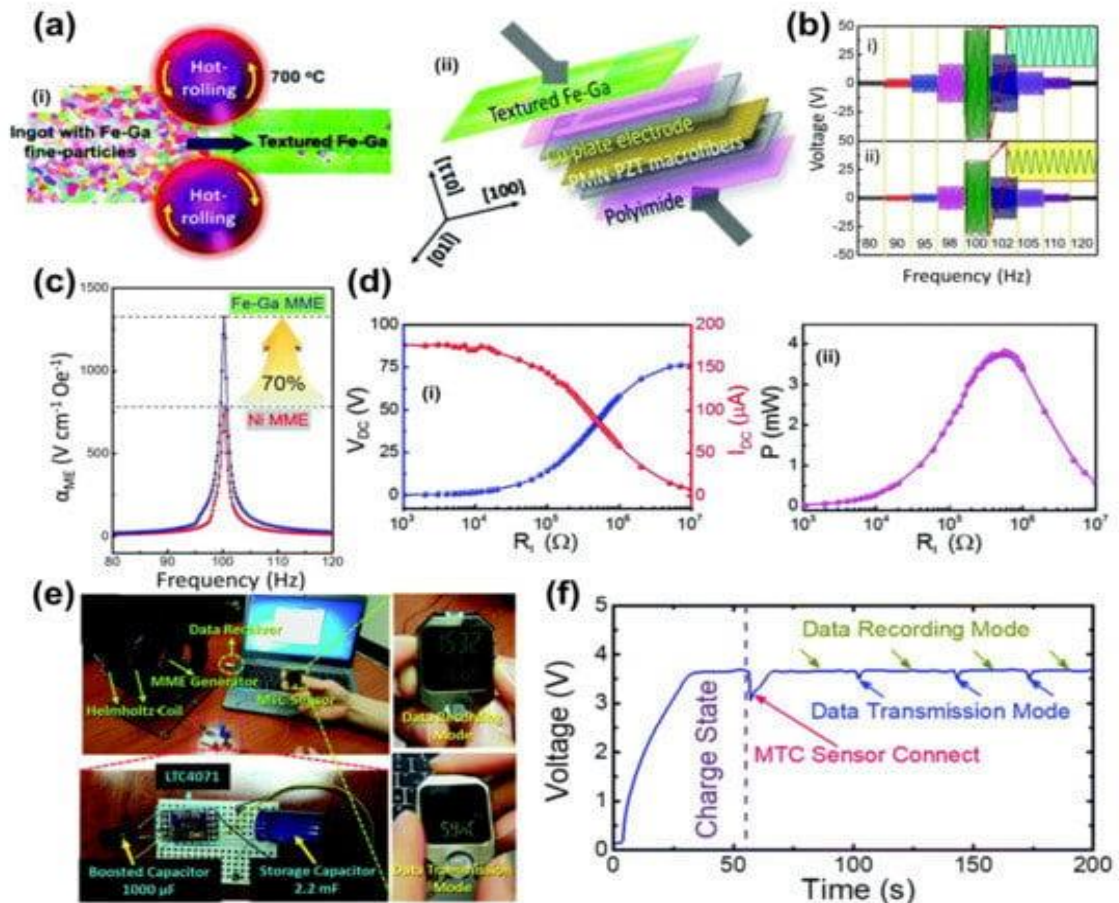


Рисунок 1.6 – (а) (i) Принципова діаграма процесу синтезу текстурованого Fe–Ga. (а) (ii) етапи виготовлення для МЕ композиту. (б) Згенеровані сигнали напруги від генераторів ММЕ, вбудованих у текстуровані шари Fe–Ga (i) та Ni (ii), виміряні на різних частотах (с) Коефіцієнт напруги МЕ (α_{ME}) як функція керуючої частоти НАС. (d) Випрямлені сигнали напруги/струму постійного струму (i) і вихідна потужність постійного струму (ii) генератора Fe–Ga ММЕ під 700 мкТл при 60 Гц. (е) Ефективність збору енергії бездротової сенсорної системи з автономним живленням за допомогою генератора ММЕ (f) Відповідь на зарядку та розрядку накопичувального конденсатора

1.5 Вплив концентрації магнітного потоку на ефективність збирання енергії ММЕ

Ефективність збору енергії композитними пристроями ММЕ була значно покращена завдяки зв'язку між високою анізотропною п'єзoeлектричною відповіддю SFC та текстурованого магнітострикційного сплаву Fe-Ga. Однак вихідна потужність генератора ММЕ на основі Fe-Ga була обмежена відносно високою проникністю сплаву Fe-Ga через індукцію сильніших

вихрових струмів навіть на низьких частотах, таким чином зменшуючи деяку зміну щільності магнітного потоку, що може зменшити вихідну потужність. Збір енергії з розсіяних магнітних полів є перспективним для бездротових сенсорних мереж (WSN) і систем IoT [3, 10, 26]. Відомо, що магнітний потік, що досягає генератора ММЕ, дуже низький порівняно із загальним розсіяним магнітним полем через його поширення в напрямку повторного набору навколо кабелів електропередачі. Продуктивність генераторів ММЕ постійно покращувалася шляхом впровадження нових матеріалів, методів, структур пристроїв тощо [7, 15, 28]. Сильний магнітний матеріал з вищою проникністю, відомий як концентратор магнітного потоку (MFC), можна використовувати для концентрації магнітного потоку на генераторі ММЕ.

У 2020 році Сонг Х. та ін. повідомили про генератор ММЕ на основі концепції MFC. [29]. Для виготовлення генератора ММЕ п'єзoeлектричний SFC (легований Mn PMN-PZ-PT в орієнтації $\langle 011 \rangle$ з модою d_{32}) був з'єднаний з магнітострикційним шаром Ni за допомогою епоксидної смоли. Чотири шматки неодимових магнітів були прикріплені як пробна маса для точки оптимізації консольної конструкції. Після оптимізації геометричної структури генератора ММЕ матеріал MFC, параметр конструкції та 3D-розташування були оптимізовані для вивчення впливу MFC на генератор ММЕ за допомогою теоретичної імітаційної моделі. Ці змодельовані результати підтверджують, що матеріал з вищою проникністю ($\mu_r \geq 600$) можна використовувати для MFC. Отже, Ni з $\mu_r 600$ обрано як матеріал MFC [30]. Крім того, такі параметри дизайну, як форма (квадрат: 10 мм $\times$ 10 мм), співвідношення сторін і кількість шарів (10 із товщиною 2,5 мм) оптимізовано для отримання вищого відгуку від MFC (рис. 1.7 а). Вихідна продуктивність генератора ММЕ перевіряється за допомогою оптимізованого MFC всередині котушки Гельмгольца, як показано на рисунку 1.7b. Магнітострикційний шар із MFC (0,691 Тл, відображено густим червоним кольором) має в 1,5 рази більший розподіл щільності магнітного потоку, ніж без MFC (0,465 Тл, відображено жовтим кольором), як показано на рисунку 1.7 c. 3D-розташування MFC на різних відстанях від генератора ММЕ оптимізовано за допомогою експериментального та теоретичного моделювання для отримання вищої вихідної потужності для пристрою з автономним живленням. Максимальна амплітуда вібрації 6,23 мм виявлена під час переміщення MFC від консолі ММЕ у напрямку вгору, що на 54% вище порівняно з випадком без MFC, як показано на рисунку 1.7 d. Вища амплітуда вібрації пояснюється концентрацією магнітного потоку на генераторі ММЕ.

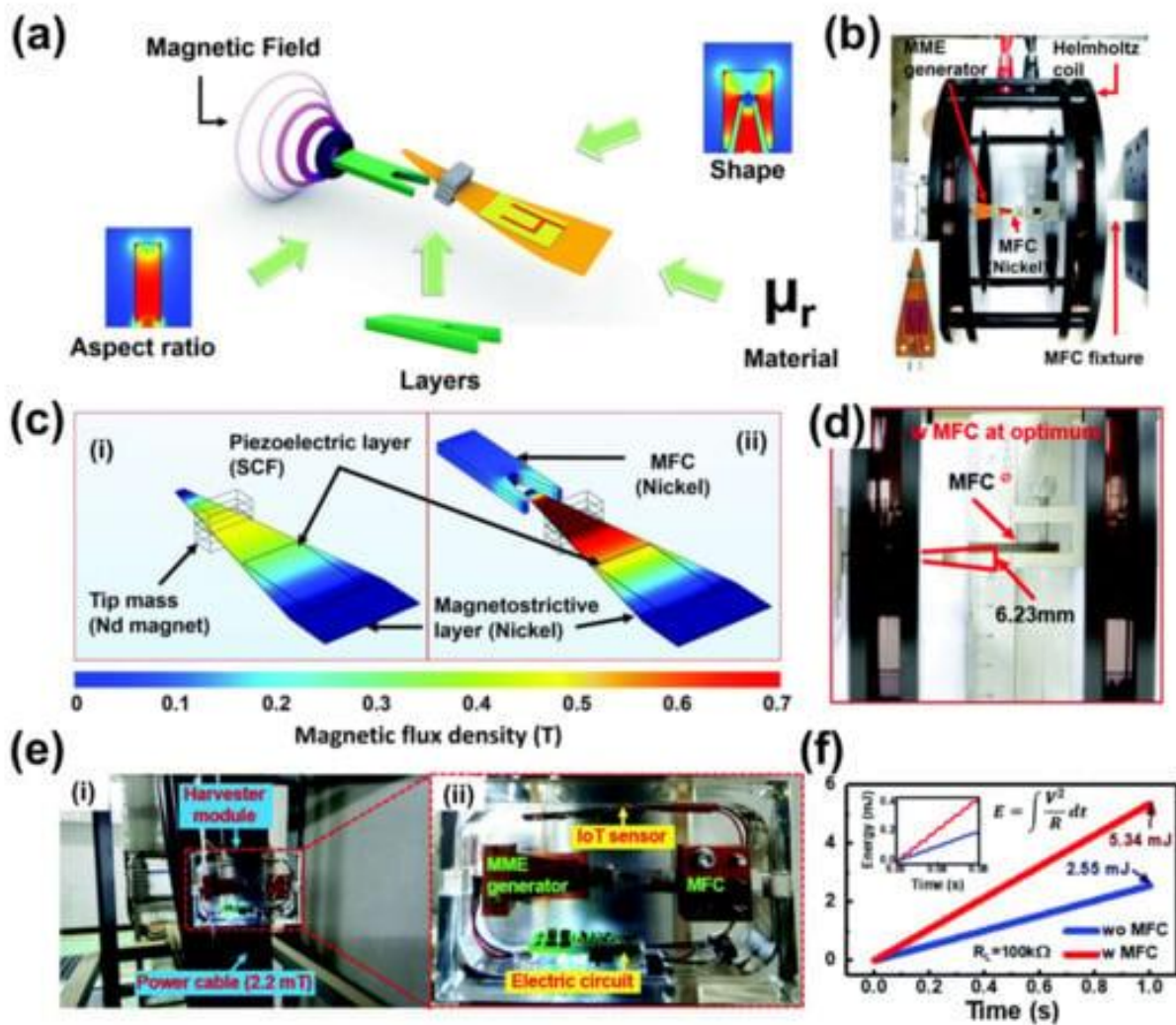


Рисунок 1.7 – (а) Схематична діаграма MFC, що концентрує магнітне поле розсіювання на генераторі ММЕ з формою, матеріалом, шарами та співвідношенням сторін. (б) Вимірювальна установка генератора ММЕ з MFC (с) Розподіл щільності магнітного потоку в магнітострикційному шарі генератора ММЕ з MFC (і) і без MFC (іі). (д) Оптимізація розташування MFC по товщині генератора ММЕ під 8 Ое. (е) Фотокопія збору енергії з кабелю живлення на підстанції за допомогою модуля збору MFC. (ф) Відгук зібраної енергії при оптимальному опорі навантаження 100 кОм з і без MFC

Бездротовий модуль моніторингу навколишнього середовища з автономним живленням сконструйовано та перевірено в магнітному полі змінного струму 22 Ое при 60 Гц. Він складається з генератора ММЕ, MFC, датчика IoT і схеми керування живленням, а потім системи, встановленої на кабелі живлення на підстанції (рис. 1.7 е). Вихідна енергія генератора ММЕ зі структурою MFC представляє вищу потужність (5,34 мВт), ніж без MFC (2,55 мВт), як показано на рисунку 1.7 ф. Вихідна потужність значно збільшилася майже вдвічі від генератора ММЕ завдяки застосуванню нового

методу, що зосереджується на магнітному потоці навколо генератора ММЕ шляхом адаптації структури MFC, включаючи матеріал, форму, співвідношення сторін, кількість шарів і 3D-розташування MFC. Бездротовий модуль моніторингу навколишнього середовища з автономним живленням, що складається з генератора ММЕ з MFC, встановленого на електростанції, може накопичувати електроенергію від магнітних полів змінного струму навколо кабелів електропередачі, і цього достатньо для роботи бездротових датчиків температури та вологості.

1.6 Гібридизація ефектів п'єзоелектричної та електромагнітної індукції на генераторі ММЕ

Незважаючи на те, що раніше повідомлялося, що генератори ММЕ на основі п'єзоелектричних кристалів мають середньоквадратичну вихідну потужність на рівні кількох мВт для роботи простих пристроїв Інтернету речей, цього може бути недостатньо для роботи багатофункціональних датчиків Інтернету речей із великим радіусом дії з високим енергоспоживанням (зазвичай досягає сотень мВт). підключення даних, які можуть збирати різноманітну інформацію про навколишнє середовище, таку як вологість, інтенсивність світла, температура, атмосферний тиск, ультрафіолетовий (УФ) індекс, CO_2 , леткі органічні сполуки (ЛОС), рівень звуку та магнітне поле [31]. Таким чином, дуже бажано виготовити високопродуктивний генератор ММЕ з вихідною середньоквадратичною потужністю понад 10 мВт, щоб продемонструвати багатофункціональні сенсорні системи IoT з автономним живленням. Щоб покращити вихідну енергію збирачів енергії, багато дослідницьких груп досліджували гібридизацію двох або трьох механізмів перетворення енергії, включаючи п'єзоелектричні, трибоелектричні та електромагнітні індукційні ефекти [32]. Таким чином, генератор ММЕ гібридного типу є розумним рішенням для помітного підвищення вихідної потужності для роботи багатофункціональних датчиків IoT з високим енергоспоживанням [33].

На рисунку 1.8 представлена концептуальна ілюстрація гібридного консольного генератора ММЕ, що складається з п'єзоелектричних та електромагнітних індукційних частин [33]. Для виготовлення гібридного генератора ММЕ монокристал PMN-PZT SFC був прикріплений до Ti консольної балки епоксидним адгезивом, а магніти NdFeB використовувалися як магнітна маса наконечника. Гібридизація частини електромагнітної індукції з п'єзоелектричною частиною досягається просто шляхом розміщення котушки мідного електромагніта біля кінця магнітів.

Щоб максимізувати продуктивність, на гібридному генераторі ММЕ використовується режим резонансу згинання другої гармоніки, який забезпечує найбільше зміщення вібраційного руху в середині Ті кантилевера. На рисунку 1.8 (bi) показано початковий стан гібридного генератора ММЕ перед збиранням врожаю. Після того, як середня частина консольної конструкції переміщується вгору за допомогою магнітно-індукованої сили за годинниковою стрілкою зовнішнім магнітним полем, п'єзоелектричний потенціал і електромагнітний індукційний струм генеруються п'єзоелектричним монокристалом і медною котушкою відповідно (рис. 8 (bii)). У стані вивільнення консольної структури ММЕ (Рис. 1.8 (biii)) середня область Ті кантилевера переміщується вниз за допомогою магнітно-індукованої сили проти годинникової стрілки зовнішнім магнітним полем, що може викликати генерацію електричної енергії за рахунок напруги розтягування на п'єзоелектричну частину та обертальний рух магнітів біля котушки соленіада (рис. 1.8 (biv)). У цій роботі вихідна потужність генератора ММЕ у другому режимі згинального резонансу значно вища, ніж у першому режимі згинального резонансу. Щоб перевірити переваги режиму другої гармоніки при роботі ММЕ, було проведено теоретичне моделювання COMSOL, як показано на рисунку 1.8 c,d. Для розрахунку одна кінцева частина консолі ММЕ була затиснута, а магнітна маса була прикріплена до протилежної частини в спрощеній 2D моделі. Коли генератор ММЕ працює на звичайних першому та другому режимах вигину, резонансні частоти першого та другого режимів становлять 13,3 та 119,5 Гц відповідно, що вказує на те, що загальна кількість періодичних рухів вгору та вниз другого режиму резонансу згинання в 10 разів вище, ніж у першому режимі за той самий час. На рисунках 1.8 c, d представлено змодельовані рухи п'єзоелектричної консольної структури ММЕ та масових магнітів при першому та другому режимах резонансного вигину відповідно. Максимальна середньоквадратична вихідна потужність п'єзоелектричної фази в другому режимі вигину в 2,5 рази вища порівняно з першим режимом вигину в результатах моделювання, як показано на рисунку 1.8(ciii). Подібним чином максимальна середньоквадратична вихідна потужність частини електромагнітної індукції в другому режимі вигину в 2,4 рази вища порівняно з 1-м режимом вигину в результатах моделювання, як показано на рисунку 1.8 (diii).

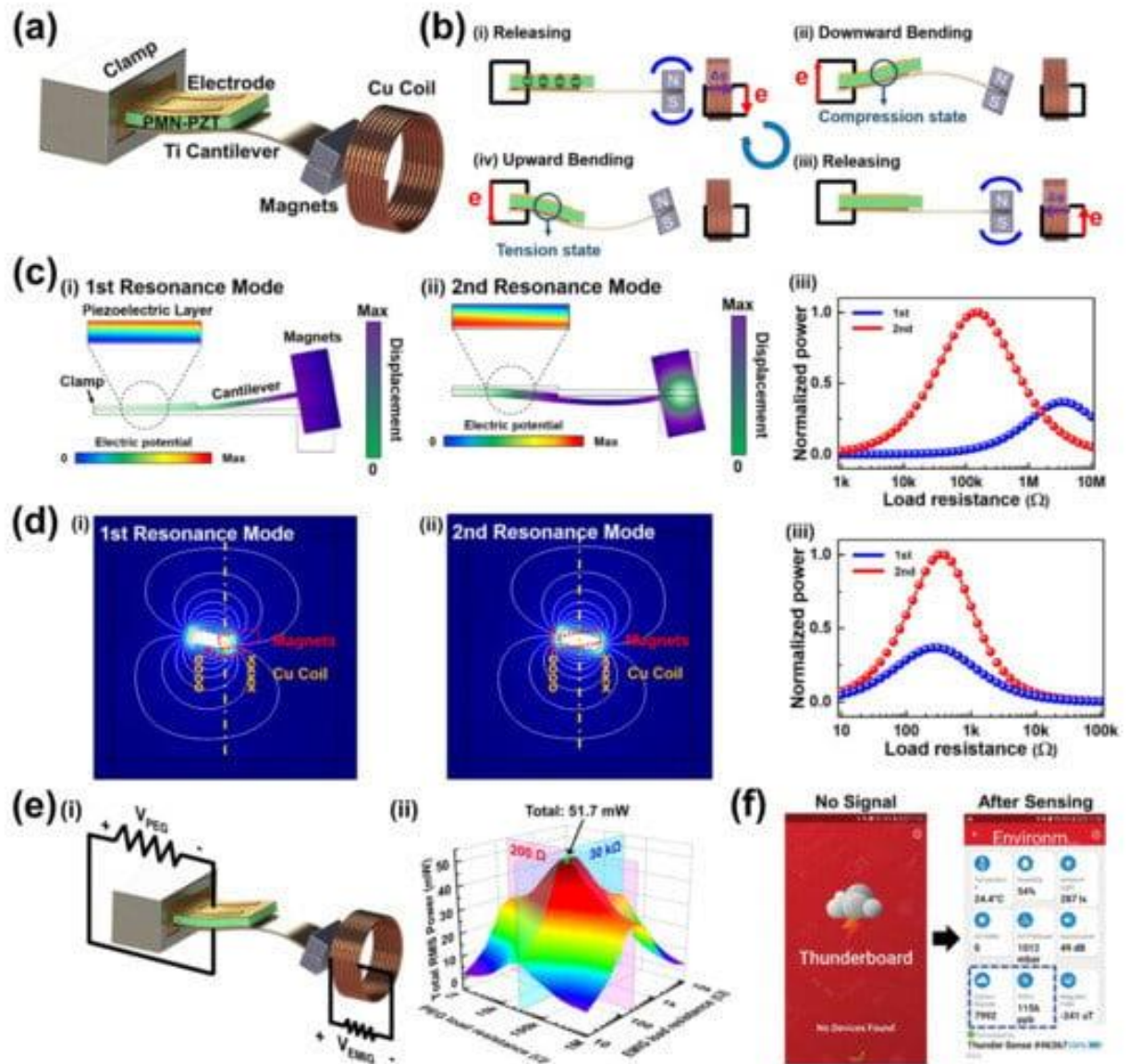


Рисунок 1.8 – (а) Ілюстрація гібридного генератора ММЕ. (б) Схематичне зображення робочого механізму гібридного генератора ММЕ, що складається з п'єзоелектричних та електромагнітних індукційних частин. Результати теоретичного моделювання ММЕ 1-го та 2-го режимів резонансного вигину для п'єзоелектричної частини (с) та частини електромагнітної індукції (д). (е) Конфігурація схеми для гібридного генератора ММЕ для характеристики середньоквадратичної потужності з умовою узгодження імпедансу (і) та загальної середньоквадратичної потужності гібридного генератора ММЕ з умовою узгодження імпедансу (іі). (ф) Миттєві знімки системи моніторингу IoT, керованої гібридним генератором ММЕ

На рисунку 1.8 (еі,іі) показана конфігурація схеми, яка використовується для вимірювання середньоквадратичної вихідної потужності з'єднаних п'єзоелектричних і електромагнітних індукційних частин з різними

зовнішніми навантажувальними резисторами та реальні результати вимірювань з умовою узгодження імпедансу. У результаті загальна середньоквадратична вихідна потужність гібридного генератора ММЕ становить 51,7 мВт, що приблизно в 10 разів вище, ніж у раніше зареєстрованих високопродуктивних генераторів ММЕ. Нарешті, автономна система визначення середовища IoT демонструється шляхом інтеграції гібридного генератора ММЕ, схеми керування живленням і багатофункціонального датчика IoT. Чудова вихідна середньоквадратична потужність від гібридного генератора ММЕ забезпечує безперервну роботу дев'яти типів датчиків навколишнього середовища та подальшу бездротову передачу даних на приймач, як показано на рисунку 1.8 f. Ця робота є першою демонстрацією середньоквадратичної вихідної потужності від генератора ММЕ, що перевищує 10 мВт.

1.7 Магніто-механо-трибоелектричний генератор (ММТЕГ)

Як згадувалося вище, генератори ММЕ традиційно демонструвалися з композиціями п'єзоелектричних матеріалів, матеріалів магнітострикції та магнітів маси. Зокрема, для п'єзоелектричної частини в генераторі ММЕ для досягнення високої продуктивності використовувалися монокристалічні матеріали, такі як PMN-PT і PMN-PZT з винятково видатними п'єзоелектричними властивостями. Однак дорогий і трудомісткий процес виробництва п'єзоелектричного монокристала може стати перешкодою для розширення практичного використання генераторів ММЕ на основі п'єзоелектричних кристалів [14]. Матеріали, що збирають енергію за допомогою ефекту трибоелектрифікації, є перспективним кандидатом на заміну п'єзоелектричних матеріалів у генераторах ММЕ, оскільки вони можуть перетворювати механічну вібрацію в електричну енергію з простими, ефективними та недорогими властивостями для майбутніх автономних систем IoT [30].

На рисунку 1.9а показано зображення установки магнітомехано-трибоелектричного генератора (ММТЕГ) всередині котушки Гельмгольца для вимірювання продуктивності на виході за допомогою індукованого змінного магнітного поля [7]. ММТЕГ складається з плівки PFA (перфторалкоксиалкани), титанового кантилевера, алюмінієвої фольги та магнітів для перевірки маси. Алюмінієва фольга розміщується над консольною структурою, прикріпленою до PFA, щоб отримати трибоелектризацію між плівкою PFA та алюмінієвою фольгою за допомогою

індукованих магнітом періодичних механічних контактних коливань. На рисунку 1.9b представлено механізм роботи ММТЕГ шляхом використання трибоелектричного ефекту та електростатичної індукції з коливальними рухами консольної конструкції вгору та вниз під зовнішнім змінним магнітним полем. З початкового стану (Рис. 1.9 (bi)) вібрація консольної конструкції вгору створює поверхневий контакт між плівкою РФА та алюмінієвою фольгою за допомогою магнітної сили магнітів під зовнішнім змінним магнітним полем, таким чином індукуючи генерацію позитивних зарядів на алюмінієвої фольги та негативних зарядів на поверхні плівки РФА, як показано на рисунку 1.9 (bii). Коли дві поверхні від'єднуються вібрацією вниз, протилежні заряди на Au електродному шарі плівки РФА перетікають між двома трибоелектричними частинами до повного звільнення консольної структури, як показано на рисунку 1.9 (biii,iv). Потім вібрація вгору знову зменшує відстань між алюмінієвою фольгою та плівкою РФА, що призводить до протилежного потоку електронів між двома трибоелектричними частинами.

Щоб збільшити контактну площу зарядки для покращення трибоелектризації в роботі ММТЕГ, складна наноструктура формується на поверхні плівки РФА за допомогою процесу осадження аерозолі з наночастинок солі. Щоб дослідити вплив наноструктур на характеристики ММТЕГ, сигнали вихідної напруги розімкнутого ланцюга наноструктурованих і неструктурованих плівок РФА вимірюються під зовнішнім змінним магнітним полем 7 Oe при $143,2 \text{ Гц}$. Сигнали розімкнутого ланцюга V_{pp} пристроїв ММТЕГ з наноструктурою та без неї досягають 708 В та 448 В , як показано на рисунку 1.9 c. На рисунку 1.9 d показано виміряну пікову потужність ММТЕГ з наноструктурами та без них шляхом зміни зовнішнього опору навантаження в діапазоні від 1 кОм до 1 ГОм . Максимальна пікова потужність наноструктурованого ММТЕГ становить $21,8 \text{ мВт}$, що в $5,7$ разів вище, ніж у неструктурованого пристрою. Щоб продемонструвати систему IoT з автономним живленням, конденсатор ємністю 1 мФ заряджається до $3,6 \text{ В}$ вихідною енергією наноструктурованого ММТЕГ протягом трьох хвилин, а пристрій-маяк IoT згодом підключається до конденсатора, як показано на рисунку 1.9 e. На вставці рисунка 1.9e показано безперервну роботу датчика IoT з інтервалом вимірювання в одну секунду за допомогою електричної енергії від ММТЕГ.

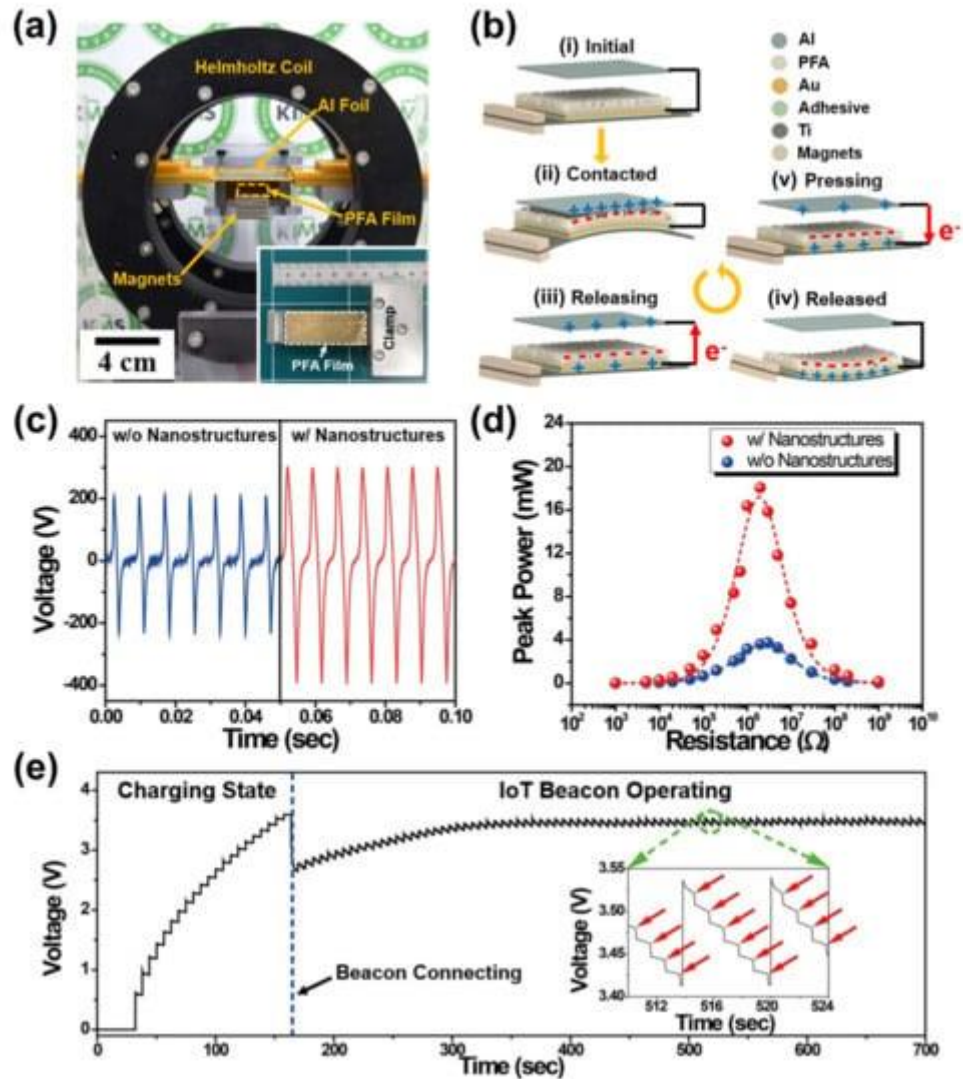


Рисунок 1.9 – (а) Фотографія системи ММТЕГ, встановленої всередині котушки Гельмгольца. (б) Механізм роботи ММТЕГ під змінним магнітним полем. (с) Сигнали напруги холостого ходу від наноструктурованих і неструктурованих пристроїв ММТЕГ. (д) Пікові значення потужності від наноструктурованих і неструктурованих пристроїв ММТЕГ. (е) Крива заряджання та розряджання для роботи датчика IoT за допомогою ММТЕГ

1.8 ММТЕГ для оптогенетичної нейромодуляції

Технологія оптогенетичної нейромодуляції широко досліджується в усьому світі для лікування неврологічних захворювань, включаючи паркінсонізм, сомніпатію та епілептичний напад [31, 32]. Щоб продемонструвати ідеальне оптогенетичне лікування, гнучкі мікророзмірні світловипромінювальні діоди (f- μ LED) з хімічною/вологою/термічною стабільністю, низьким нагріванням та високою енергоефективністю вважаються видатним інструментом стимуляції для тварин, що вільно

рухаються [33]. Незважаючи на те, що оптогенетична система була успішно продемонстрована у вигляді імплантованого пристрою, який включає незалежне джерело живлення батареї, обмежена ємність звичайної батареї може вимагати періодичної заміни розрядженої батареї кожні $\sim$ п'ять років [34]. MMTEG, засновані на перетворенні енергії магнітного поля навколишнього шуму в електричну енергію, є сильним кандидатом для демонстрації автономних оптогенетичних біомедичних систем [35].

На рисунку 1.10a показана схематична ілюстрація процесу виготовлення MMTEG та його оптогенетичного застосування шляхом увімкнення f- μ LED. Розчин наночастинок оксиду міді (CuO) наноситься центрифугуванням на трибоелектричну нейлонову плівку як підсилювач нагріву під час процесу фототермічного відпалу спалахом, який викликає термічну деформацію поверхні нейлонової плівки для збільшення площі поверхні, як показано на рисунку 1.10 (ai). На рисунку 1.10 (aii) показана морфологія поверхні нейлону з нанорозмірною нерівною текстурою та мікромасштабною зморшкуватою структурою після травлення частинок CuO. Згодом виготовляється консольно структурований MMTEG з використанням флеш-штампованої нейлонової плівки, титанової пластини, тефлонової плівки та магнітної маси NdFeB, як показано на рисунку 1.10 (aiii). Перетворюючи магнітне поле змінного струму в електричну енергію за допомогою MMTEG, імплантовані f- μ LED всередині черепа миші можна підсвічувати для оптогенетичної нейромодуляції, щоб викликати штучну зміну поведінки (рис. 1.10 (aiv)). Щоб дослідити вплив багатомасштабної структури спалаху на поверхню нейлону для трибоелектричного перетворення енергії, вихідні характеристики штампованих і незайманих MMTEG порівнюються при змінному магнітному полі 7 Oe. Вихідні сигнали розриву V_{pp} і струму короткого замикання вимірюються як 870 В/145 мкА для багатомасштабного структурованого MMTEG і 638 В/100 мкА для неструктурованого MMTEG, демонструючи, що помітне підвищення продуктивності MMTEG реалізується після процесу флеш-відпалу нейлонової плівки.

На рисунку 1.10b представлено експериментальну установку для живлення f- μ LED-діодів за допомогою MMTEG, посиленого спалахом, під розсіяним змінним магнітним полем 2,1 Oe при 60 Гц, індукованим електричним проводом фена. MMTEG може генерувати сигнали напруги холостого ходу та струму короткого замикання 237 В та 33 мкА відповідно за цих умов, чого достатньо для постійного ввімкнення пристрою f- μ LED, як показано на рисунку 1.10 c. На рисунку 1.10d показана схематична ілюстрація оптогенетичної нейромодуляції з автономним живленням на живій миші з імплантованими f- μ LED, що живляться від MMTEG.

Опромінення червоного світла від світлодіода на модифіковані клітини первинної моторної кори M1 призводить до нейронного збудження, щоб викликати рух вуса миші. Як наслідок, автономна оптогенетична нейромодуляція за допомогою ММТЕГ може отримати помітні рухи вусів миші, які відстежуються системою захоплення відео та програмою аналізу зображень, як показано на рисунку 1.10 (e,i,ii). Цей результат вказує на те, що ММТЕГ під крихітним магнітним полем змінного струму може діяти як джерело енергії для біомедичних імплантованих пристроїв шляхом доповнення або заміни звичайних батарей.

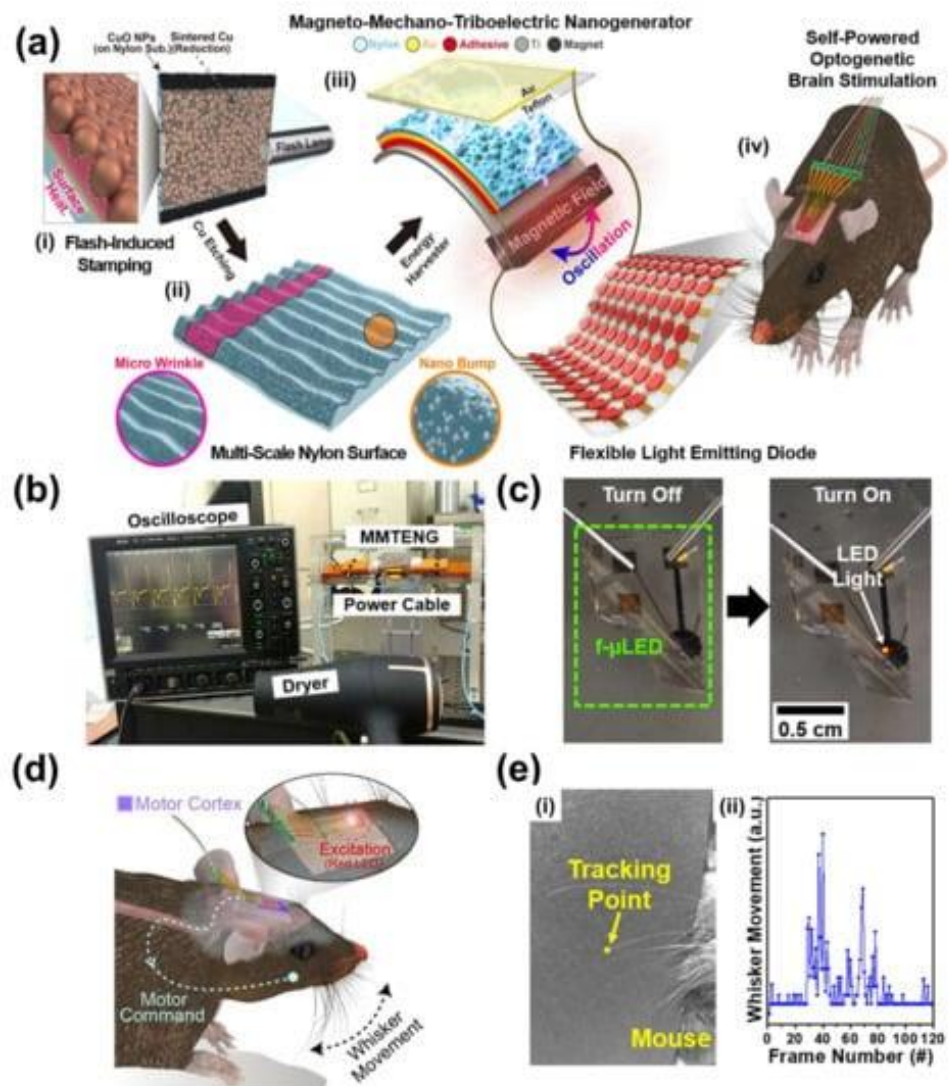


Рисунок 1.10 – (а) Схематична ілюстрація процесу виготовлення ММТЕГ і його застосування для оптогенетичної нейромодуляції. (б) Сфотографуйте зображення ММТЕГ для генерації електроенергії поблизу кабелю живлення побутового приладу. (с) Фотографія f-μLED, що вмикається ММТЕГ. (д) Схематична ілюстрація оптогенетичної нейромодуляції під черепом миші. (е) Відео відстеження точки оптогенетичної нейромодуляції (і) і руху вусів під час процедури (ii)

1.9 Композит ММЕ, чутливий до ультрамагнітного поля, створений завдяки фотонному відпалу спалаху

Хоча визначення крихітного низькочастотного магнітного поля змінного струму за допомогою композитів ММЕ у режимі резонансного вигину є складним через високий рівень сигналу шуму (спричинений вібрацією навколишнього середовища), композит ММЕ можна використовувати як надчутливий датчик магнітного поля змінного струму з покращенням властивості матеріалу [37]. Щоб досягти видатної продуктивності магнітного детектування, важливо враховувати магнітоmechanічні властивості перетворення з магнітними та пружними втратами магнітострикційних матеріалів в умовах резонансу [10]. Зокрема, магнітоmechanічні втрати можуть бути зменшені шляхом підвищення п'єзомагнітних властивостей і механічної добротності магнітострикційних матеріалів за допомогою нанокристалізації фази [22].

На рисунку 1.11a показано експериментальний процес виготовлення та переваги поверхневої нанокристалізації аморфного сплаву FeBSi (Metglas) за допомогою технології спалахового фотонного відпалу [16]. Зауважте, що звичайна техніка термічного відпалу для нанокристалізації метгласу для мінімізації втрат енергії зазвичай спричиняє перехід від пластичного до крихкого, що може стати перешкодою під час процесу виготовлення пристрою в результаті механічного розтріскування листів метгласу. Навпаки, опромінення спалахом фотонів на аморфному листі Metglas з відповідними умовами високої температури та дуже короткою (~0,3 мс) тривалістю імпульсу може створити лише кілька нанокристалів (розмір менше 10 нм) на поверхні Metglas для посилення магнето -механічні властивості, такі як магнітострикція та механічна добротність без значної крихкості. На рисунку 1.11b представлено зображення поверхні Metglas з високою роздільною здатністю (HRTEM) і скануючого мікроскопа (SEM, верхня ліва вставка) для дослідження впливу фотонного відпалу спалаху на мікроструктуру. Внаслідок часткового окислення поверхні на аморфній поверхні Metglas за допомогою флеш-відпалу, на SEM-зображенні частково утворюються темні кольорові зони, а нанокристали із середнім розміром кристалітів 10 нм з'являються в темній кольоровій зоні фотонно-спалахового відпалу Metglas. Завдяки нанокристалізації з'являється кілька смуг кільцеподібної форми з яскравими кристалічними плямами в моделях швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), як показано на правій нижній вставці на рисунку 1.11b.

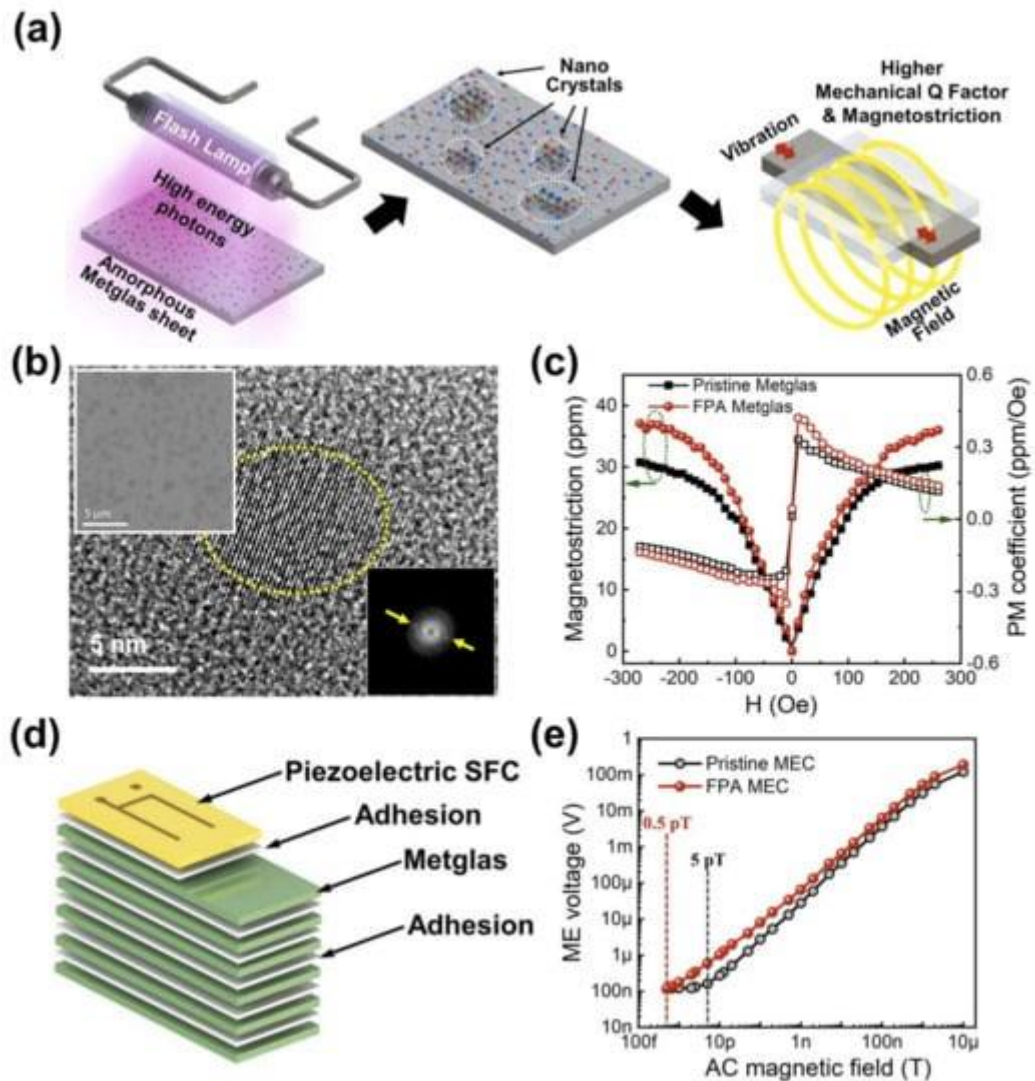


Рисунок 1.11 – (а) Схематичне зображення процесу фотонного відпалу спалаху на листі Metglas та очікуване покращення властивостей. (б) Результати аналізу мікроструктури на поверхні Metglas після фотонного відпалу. (с) Криві магнітострикції та п'єзомагнітного коефіцієнта флеш-відпалених та первинних шарів Metglas. (д) Схематичне зображення датчика магнітного поля ММЕ на основі ламінування Metglas. (е) Сигнали відповіді вихідної напруги миттєво відпалених і первинних датчиків ММЕ шляхом застосування змінного магнітного поля

Магнітострикційні криві відпаленого та невідпаленого ламінування Metglas (шість шарів) виміряно при кімнатній температурі, як показано на рисунку 1.11с. Значення насиченої магнітострикції ламінатів Metglas, відпалених фотоном спалаху, становлять 30,2 ppm і 36,0 ppm відповідно, що відповідає поздовжнім п'єзомагнітним коефіцієнтам 0,33 ppm і 0,42 ppm відповідно. Це підвищення п'єзомагнітної константи нанокристалізованого спалаху Metglas пояснюється (1) перетворенням випадкового вирівнювання в

систематичне вирівнювання з напрямком намагніченості та (2) усуненням залишкової напруги, яка зазвичай перешкоджає обертанню магнітних нанодоменів. Крім того, ламінування Metglas після фотонного відпалу спалахом показує на 26,8% вищий механічний коефіцієнт якості з 9% вищим значенням твердості порівняно з первинним зразком, що є перевагою для отримання видатних магнітомеханічних характеристик перетворення в умовах резонансу. На рисунку 1.11d показано структуру пристрою двошарового ламінату ММЕ для надчутливого датчика магнітного поля, який складається з монокристала PMN-PZT SFC і шестишарового ламінування Metglas. Нарешті, досліджується ефективність виявлення магнітного поля змінного струму композитів ММЕ за допомогою швидковідпалених і чистих листів Metglas, як показано на рисунку 1.11e. Датчик ММЕ із фотонним спалахом показав межу виявлення 0,5 рТ при резонансній частоті 99,3 Гц, що становить 10-кратне покращення продуктивності порівняно з первинним зразком ММЕ (5 рТ при 97,7 Гц). Ця видатна межа виявлення після фотонного відпалу спалаху є сукупним результатом зменшення резонансних втрат, покращеної магнітної чутливості та стійкості до навколишнього вібраційного шуму Metglas, обробленого спалахом. Композит ММЕ, відпалений миттєвим відпалом, є потенційною альтернативою надчутливим датчикам магнітного поля змінного струму в області практичного застосування для виявлення біомагнетизму та надзвичайно низькочастотних сигналів, небезпечних для людини.

На рисунку 1.12 наведено короткий підсумок щодо покращення вихідної потужності композитних генераторів ММЕ з 2015 року. Для порівняння вихідної продуктивності використовували середньоквадратичну вихідну потужність або середню вихідну потужність змінного струму, що генерується генераторами ММЕ. Вихідна потужність композитних генераторів ММЕ поступово покращувалася і нещодавно досягла 50 мВт, що достатньо для роботи багатофункціональних датчиків IoT. Однак вихідна потужність повинна бути збільшена вище 100 мВт для подачі електроенергії в датчики навколишнього газу або хімічні IoT, щоб розширити область практичного використання композитних генераторів ММЕ. Продуктивність генератора ММЕ може бути покращена за рахунок застосування нових матеріалів, включаючи сплави з магнітною пам'яттю форми, які мають видатну механічну деформацію, деформацію та відгук під впливом зовнішнього магнітного поля та механічної сили порівняно зі звичайними магнітострикційними матеріалами [39]. Іншою технічною проблемою, пов'язаною з композитним генератором ММЕ, є розробка високоефективної схеми керування живленням для перетворення вихідного сигналу змінного

струму в сигнал постійного струму. Дослідження передових електронних схем, включаючи випрямляч змінного струму в постійний струм, перетворювач постійного струму в постійний струм і блок накопичення енергії, тому значно необхідні для покращення енергії, видобутої з генераторів ММЕ, з мінімізацією втрат енергії.

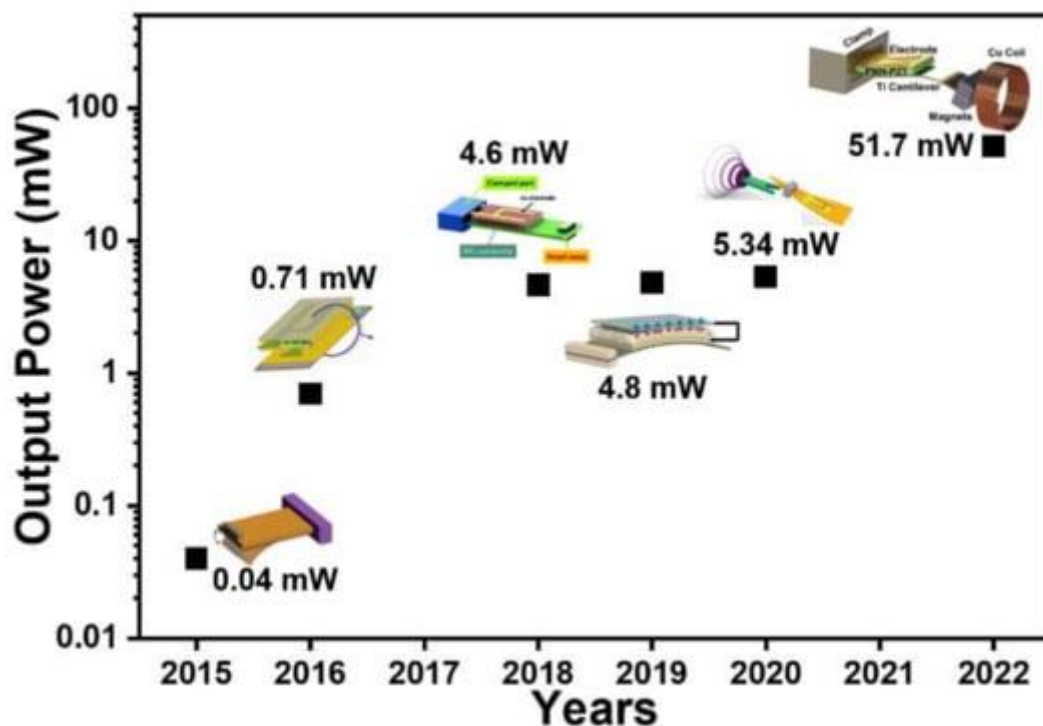


Рисунок 1.12 – Зведення про вихідну потужність композитних генераторів ММЕ з 2015 року. Copyright 2015, 2018, 2019, 2020, Королівське хімічне товариство. Авторське право 2016, 2022, John Wiley & Sons, Inc

Як датчик магнітного поля, композит ММЕ демонструє дуже чутливу здатність, навіть дозволяючи виявити діапазон нижче рТ. Така ефективність чутливості забезпечується процесом короткочасного фотонного відпалу спалаху на магніострикційному аркуші Metglas для індукції поверхневої нанокристалізації. Цей магнітний датчик на основі ММЕ демонструє потенційне використання композитного датчика ММЕ як нового пристрою моніторингу для діагностики дуже слабкого біомагнетизму. Для того, щоб у майбутньому безпосередньо виявляти біомагнітне поле серця та мозку людини за допомогою композитів ММЕ, необхідно буде отримати надійні життєво важливі дані за допомогою передових методів обробки сигналів, включаючи вибірку даних, фільтрацію шуму та посилення сигналу.

1.10 Висновки до розділу

У цьому розділі описано декілька високоефективних композитних пристроїв ММЕ, що складаються з п'єзоелектричних, магнітострикційних, трибоелектричних і постійних магнітних матеріалів, які були розроблені для збирачів енергії та датчиків магнітного поля для IoT та біомедичних застосувань. Композитні матеріали ММЕ можуть забезпечувати перетворення розсіяних магнітних полів в електричний сигнал і, таким чином, можуть використовуватися як високоефективні генератори енергії або надчутливі магнітні датчики. Зокрема, композити ММЕ з модифікацією п'єзоелектричних кристалів і магнітострикційних матеріалів шляхом адаптації кристалографічної орієнтації або покращення властивостей втрачають помітне збільшення вихідної потужності для генераторів ММЕ. Крім того, застосування структури концентрації магнітного потоку та поверхнево-модифікованих трибоелектричних матеріалів або гібридизація кількох принципів перетворення енергії в генераторах ММЕ забезпечує безперервну роботу датчиків IoT, а також оптогенетичну нейромодуляцію без зовнішніх джерел енергії. Незважаючи на те, що композитні генератори ММЕ не можуть працювати в електромагнітному полі навколишньої радіочастоти (РЧ), вони можуть працювати на відносно низькій частоті <200 Гц через відносно низьку частоту механічного резонансу. Крім того, з точки зору вихідної потужності, генератори ММЕ можуть генерувати електричну потужність на рівні мВт, яка є більшою, ніж раніше повідомлялося про збирачі радіочастотної енергії (вихідна потужність на рівні мкВт). Ця технічна розробка може розширити застосування генераторів ММЕ як постійного джерела електроенергії в IoT з автономним живленням та імплантованих біомедичних пристроях для підтримки або заміни звичайних батарей.

2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІЗОТРОПНОГО ВИМІРЮВАЧА ЩІЛЬНОСТІ МАГНІТНОГО ПОТОКУ НА ОСНОВІ ІОТ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ПОЛЯ ELF

У цьому розділі представлено основні принципи реалізації ізотропного лічильника на основі надзвичайно низькочастотного (ELF) IoT, який може вимірювати щільність магнітного потоку від 100 нТл до 10 мкТл. Ідентичні датчики використовуються для вимірювання ізотропного поля в площинах X, Y і Z. Прототип має плоску характеристику в діапазоні частот від 40 Гц до 10 кГц, виявляючи та вимірюючи кілька джерел магнітного поля. Пропонований недорогий вимірювач може вимірювати поля від електромережі та її гармоніки в робочій смузі частот. Запропонована схема вимірювача щільності магнітного потоку проста у реалізації, а вимірне поле може відображатися на будь-якому мобільному пристрої з підключенням Wi-Fi. Плата Arduino з вбудованим модулем Wi-Fi Nina відповідає за передачу даних із датчика в хмару як повне рішення IoT, що підтримується додатком Blynk через операційні системи Android та iOS або веб-інтерфейс. Крім того, у нашому дослідженні також була запропонована схема збору енергії ELF (ЕН) для використання змінних магнітних полів (50 Гц), отриманих від роботи кількох споживчих пристроїв, таких як трансформатори, джерела живлення, фени тощо, за допомогою програми з низьким споживанням. Експериментальні вимірювання показали, що напруга збирання (постійного струму) може досягати 4,2 вольт від магнітного поля 33 мкТ, спричиненого роботою електричного фена, і може повністю зарядити накопичувальний конденсатор (C_s) 100 мкФ запропонованого ЕН. системи приблизно за 3 хв.

2.1 Математична модель ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку

Численні дослідження показали, що тривалий вплив значних надзвичайно низькочастотних (ELF) магнітних полів (1 Гц–100 кГц) може призвести до серйозних проблем зі здоров'ям. Значне підвищення рівня тригліцеридів у крові, передбачуваний індикатор стресу у людей, дезорієнтація курчат і скорочення часу відповіді у мавп є деякими тривожними ефектами впливу полів НЧ [40]. Хоча деякі інші дослідження не показують зв'язку, епідеміологічні дослідження показують позитивний зв'язок між житловим/побутовим і професійним впливом полів ELF і кількома формами раку, такими як дитяча лейкемія [41].

Магнітні поля (МП) залежать від типу, поля, частоти та довжини хвилі випромінювання. Залежно від живлення струму створюються або статичні магнітні поля (SMF) з постійним струмом (DC), або змінні магнітні поля (AMF) зі змінним струмом (AC). На відміну від SMF, полярність AMF залишається постійною, незважаючи на періодичні зміни напрямку потоку струму. Деякі пристрої створюють потужні низькочастотні магнітні поля, такі як трансформатори, електродвигуни, електронагрівачі, фени, джерела живлення та електронно-променеві трубки (ЕПТ), а також виробляють, розподілюють і споживають електроенергію 50 або 60 Гц. . У медицині магнітно-резонансна томографія (МРТ) використовує потужне SMF, і пацієнти часто піддаються впливу від 1,5 до 3 Тл. Громадськість час від часу висловлювала серйозне занепокоєння щодо використання деяких із цих пристроїв як джерел сильних магнітних полів.

Залежно від джерела опромінення та відстані від цього джерела напруженість магнітного поля може значно відрізнятися. Залежно від того, наскільки добре протилежні лінії магнітного потоку компенсують одна одну або наскільки добре лінії зі струмом збалансовані, швидкість, з якою інтенсивність поля зменшується з відстанню, може відрізнятися від одного джерела до іншого. При збільшенні відстані поля від котушок, магнітів або трансформаторів швидко зменшуються в $1/r^3$. У лініях електропередач часткове погашення поля призводить до того, що падіння становить $1/r^2$, коли струми течуть у протилежних напрямках. Коли існує незбалансований струм, інтенсивність поля зменшується повільніше, ніж $1/r$, як показано на рисунку 2.1 [43].

Методологія вимірювання надзвичайно низьких частот (ELF), як визначено Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU), є досить складною. На відміну від вимірювання високочастотних полів, надзвичайно низькочастотні поля представляють труднощі у їх вимірюванні, оскільки на цих частотах відповідні довжини хвиль перевищують 100 м, що ускладнює точні вимірювання в ближньому полі [44]. Слід зазначити, що величини напруженості електричного поля, напруженості магнітного поля та еквівалентної густини потужності використовуються для визначення опромінення населення за допомогою відповідних вимірювальних пристроїв. Що стосується впливу магнітних полів на громадську безпеку, виміряні значення повинні задовольняти математичному рівнянню (2.1):

$$\sum_{1\text{Hz}}^{150\text{KHz}} \frac{H_i}{H_{Li}} \leq 1, \quad (2.1)$$

де H_i – вимірювання напруженості магнітного поля, а H_{Li} – контрольний рівень опромінення на частоті i , як зазначено в таблиці 2.1, зазначаючи, що обмеження електромагнітного випромінювання відповідно до законодавства Греції відповідають 70% значень, описаних.

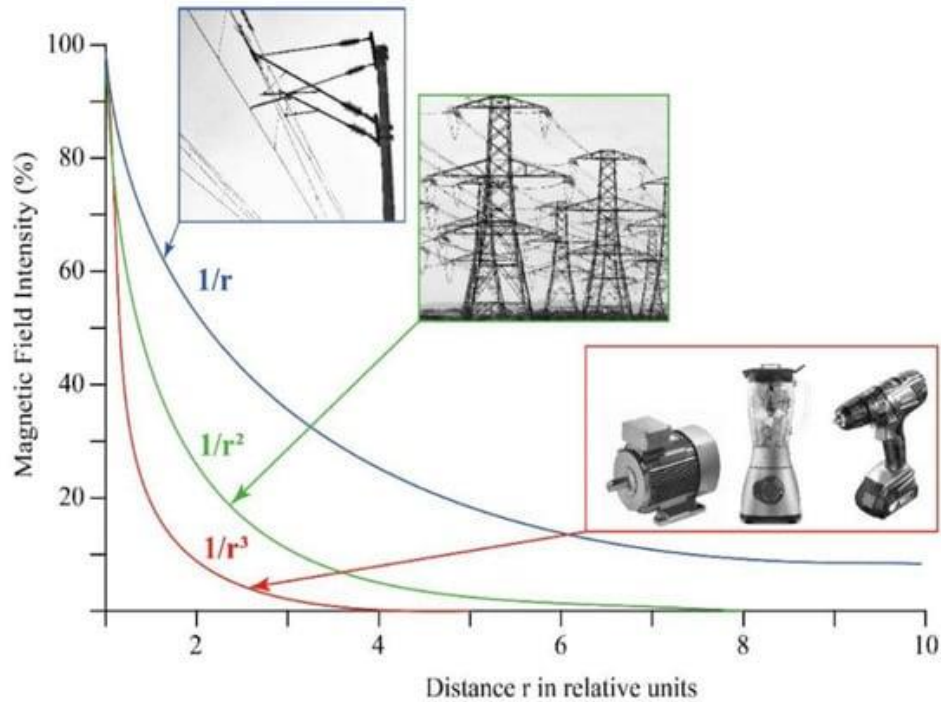


Рисунок 2.1 – Напруженість магнітного поля зменшується зі збільшенням відстані від поля з швидким ($1/r^3$, $1/r^2$) або повільним ($1/r$) спаданням [41]

Метод зваженого піку (WPM) [42] був створений у рекомендаціях ICNIRP 2010 для несинусоїдальних багаточастотних полів. Цей метод, включений до Директиви 2013/35/EU [43], необхідний для оцінки ефектів електростимуляції (нетеплових) на НЧ/КНЧ частотах і є обов'язковим у всіх промислових застосуваннях для безпеки працівників. Комплексні сигнали зважуються за допомогою функції фільтра, яка враховує фазу сигналів, як описано наступним рівнянням [44]:

$$\left| \sum_i \frac{A_i}{E_{Li}} \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \varphi_i) \right| \leq 1, \quad (2.2)$$

де t — час експозиції, а A_i та E_{Li} — амплітуда гармонічної складової та межа експозиції на i -й частоті f_i гармоніки відповідно. Фазовий і фільтраційний кути поля на гармонічних частотах також описуються θ_i , φ_i . Крім того,

знаючи, що ізотропні вимірювання повинні проводитися вздовж осей X , Y і Z , загальне виміряне магнітне поле H_i описується рівнянням (3):

$$H_i = \sqrt{H_{x,i}^2 + H_{y,i}^2 + H_{z,i}^2} . \quad (2.3)$$

Таблиця 2.1 – Референтні рівні електричного та магнітного полів у Європейському Союзі для загального опромінення населення, зосередженого на надзвичайно низьких частотах (ELF) [41, 44]

Freq. Band	Electric Field Strength (V/m)	Magnetic Field Strength (A/m)	Magnetic Field Induction (μ T)
0–1 Hz	-	3.2×10^4	4×10^4
1–8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$
8–25 Hz	10,000	$4000 / f$	$5000 / f$
0.025–0.8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$
0.8–3 kHz	$250 / f$	5	6.25
3–150 kHz	87	5	6.25

Where f , is the frequency in Hz or kHz, depending on how it is defined in the table cell that is in the same row and column of the frequency band. No E-field value is defined for frequencies less than 1 Hz, which are essentially static electric fields.

Постійний інтерес до надійних вимірювань впливу на населення магнітних полів надзвичайно низької частоти (ELF) спонукав дослідників до впровадження вимірювальних пристроїв протягом кількох років. Джерела сильного магнітного поля можна виявити за допомогою вимірювача магнітного поля ELF, якщо вжити необхідних заходів обережності [43, 44]. Автори в [45] представили широкосмуговий вимірювач магнітного поля в Національному бюро стандартів (NBS) у 1985 році. Запропонований вимірювач має ізотропний зонд, що складається з трьох взаємно ортогональних петель діаметром 10 см кожна для вимірювання магнітного поля. до 30 А/м. Новизна цієї реалізації базувалася на кількох удосконаленнях порівняно з доступними на той час інструментами, такими як динамічний діапазон 44 дБ, плоска частотна характеристика (приблизно $\pm 1,0$ дБ), ізотропна характеристика (приблизно $\pm 0,3$ дБ) і переваження можливість використання лише однієї головки зонда. Робота в [46] представила датчик для вимірювання ізотропного магнітного та електричного полів на частотах менше 100 кГц, що визначає електромагнітні перешкоди, що спеціалізуються на діапазоні звукових частот. Автори в [47] використовують три ортогонально орієнтовані котушки як датчик ЕМП, запроваджуючи метод вимірювання, який дозволяє точно аналізувати

розподіл поля. Дослідження пропонує дослідницьку методику, яка передбачає оцінку сили електромагнітного поля, створюваного випромінювальною котушкою в системі бездротової передачі енергії (WPT) як за величиною, так і за напрямком.

Сьогодні технологія вимірювачів електричних і магнітних полів (ЕМП) значно просунулася вперед, пропонуючи інженерам вимірювання з меншою невизначеністю та функцію віддаленого моніторингу обладнання в реальному часі. Професійним рішенням для безперервного моніторингу електричних і магнітних полів є зондовий аналізатор Narda PMM ENP-50C [44], який може розпочати збір із зберігання даних протягом 24 годин у робочому діапазоні частот від 5 Гц до 100 Гц. кГц. Аналізатор має різноманітні режими роботи, включаючи автономний режим без підключення зовнішнього обладнання та співпрацю з Pocket-PC або портативним дисплеєм Narda PMM 8053A через оптоволоконний зв'язок. У [46] представлений ще один аналізатор для вимірювання магнітних і електричних полів на робочих і громадських місцях. Narda EFA-300 забезпечує аналіз поля за допомогою обчислення ШПФ у поєднанні з вбудованими ізотропними зондами магнітного поля, як показано на рисунку 2.2. Це нове покоління обладнання передбачає суттєво спрощення процесу вимірювання. Narda EFA-300 включає в себе новий режим STD (Shaped Time Domain) на додаток до визначення середньоквадратичних і пікових значень за допомогою звичайної техніки фільтра, забезпечуючи просте, але надійне вимірювання навіть у складних середовищах. Що стосується вимірювань магнітного поля, аналізатор Narda EFA-300 може виявляти поля від 1 нТл до 31,6 мТл у робочому діапазоні частот від 5 Гц до 32 кГц.

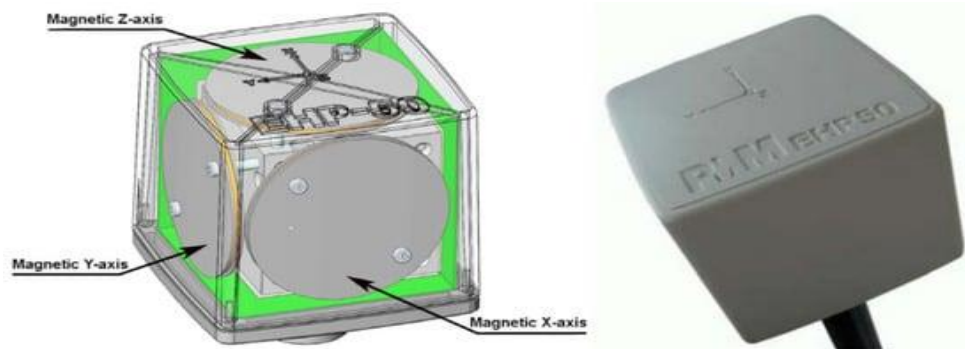


Рисунок 2.2 – Внутрішня структура зонда-аналізатора Narda PMM ENP-50C для вимірювання магнітних і електричних полів у діапазоні частот від 5 Гц до 100 кГц. Ідентичні круглі сенсорні зонди призначені для вимірювання ізотропного поля в площинах X, Y та Z

У 2006 році автори [47] представили широкосмугову систему моніторингу для оцінки впливу електромагнітного випромінювання, зосереджену на радіочастотах (радіо- та телевізійних передач, систем мобільного зв'язку, Wi-Fi та зв'язку TETRA). Запропонована система під назвою «SMS- K», було реалізовано для запису E - поля на 24-годинній основі та надсилання даних до центральної бази даних через з'єднання GSM, як платформа EMF IoT на ранній стадії. Вимірювання в режимі реального часу доступні через веб-інтерфейс для інформування громадян в рамках проекту «FASMA» [47], який підтримує Wind Hellas Telecommunications SA. Після цього інші проекти моніторингу ЕМП під назвою «HERMES» (2002) [17], «Pedion 24» (2006) [48] та «Національна обсерваторія електромагнітних полів» (2015) [49] були розроблені для постійного дистанційного моніторингу електромагнітного випромінювання через розподілену мережу фіксованих лічильників у Греції. У цих проектах монітори зони Narda AMS-8061/G [20], AMB-8059 [21] і AMB-8057-03/G [22] використовувалися лише для вимірювання електромагнітного поля в широкому робочому діапазоні частот (100 кГц–7 ГГц). Дані вимірювань з кожної автономної станції надсилаються до центральної бази даних через мережу 3G/GPRS для інформування громадян через веб-портал проекту.

Безперечно, існування магнітних полів у міських і напівміських середовищах може бути використано як ще одне аварійне джерело енергії (за певних умов) для живлення пристроїв з низьким споживанням, таких як датчики IoT. Численні місця можуть бути корисними для датчиків, де щільність магнітного потоку може бути достатньо високою для живлення вузла WSN з низьким споживанням, наприклад, на високовольтних підстанціях, поблизу залізниць тощо. Кілька опублікованих досліджень охоплюють дослідження рівнів щільності магнітного потоку (B) під повітряними лініями електропередач [23]. Дослідники підтвердили, що щільність потоку поблизу землі знаходиться в допустимих межах. Зрозуміло, що різні типи опор матимуть різну фізичну структуру повітряної лінії електропередач і типові струми в лінії, що призводить до змінної щільності магнітного потоку.

Автори в [24] пропонують нову та ефективну котушку-метелик для збору енергії магнітного поля під повітряними лініями електропередач, що забезпечує автономне живлення великої кількості датчиків. На відміну від типового способу розміщення енергозбирача на лініях електропередач, запропоновану котушку не потрібно кріпити до лінії, її можна розташувати просто над землею, що дозволяє жити датчики більшого об'єму.

Робота в [25] представляє дослідження генератора, який може постійно заряджати батареї для імпульсного зв'язку, використовуючи магнітне поле, створене високовольтними лініями постійного струму. При її виконанні не потрібен дорогий магнітний матеріал; однак, для використання запропонованого навісного комбайна на практиці слід враховувати кілька питань ізоляції, включаючи явище корони в лініях електропередачі.

У [26] представлено окремо стоячий індуктивний харвестер для використання в місцях з навколишніми магнітними полями, спричиненими віддаленими та/або важкодоступними провідниками. Дослідники представили бездротовий датчик з автономним живленням, використовуючи навколишнє магнітне поле 50 Гц на підстанціях високої напруги (HV). Результати лабораторних експериментів показали, що запропонований збирач магнітного поля датчика може забезпечувати корисну середню потужність 300 мкВт при розміщенні в щільності магнітного потоку 18 мкТ (RMS).

Ґрунтуючись на численних експериментах із використанням різних котушок індуктивності та комбінацій струмопровідних провідників, автори в [27] пропонують аналіз доцільності використання енергії, отриманої від паразитної електромагнітної енергії побутових ліній електропередач змінного струму. Результати надихають, оскільки можна зібрати до 2 мВт електроенергії, використовуючи прості компоненти для реалізації комбайна.

Дослідження в [28] представляє дві різні конфігурації, оцінені на місці вздовж норвезької залізниці та в контрольованих лабораторних умовах для підтримки життєздатності збору енергії магнітного поля (MF-EH) в електричних залізницях. Вихідна потужність запропонованої системи може досягати 40,5 мВт при 50 Гц, коли вона розташована поблизу імітованої ділянки залізниці, що переносить струм 200 А, на основі експериментальних вимірювань, проведених у лабораторії. У регіоні з помірним трафіком прототип системи збирає 109 мДж від одного електропоїзда, що дає орієнтовну денну вихідну енергію 1,14 Дж.

У [29] представлено інше застосування збирача енергії магнітного поля (MF-EH) для залізниць для живлення бездротових датчиків для моніторингу стану. У цьому дослідженні була розроблена, вдосконалена та випробувана система MFEN для збору енергії від зворотних тягових струмів залізничних колій. Магнітне осердя було створено за допомогою двох колекторів потоку, щоб частково охопити рейкову колію на основі дисперсії магнітного поля навколо рейкової колії. Вимірювання показують, що вихідна потужність MFEN була зменшена завдяки зменшенню втрат на вихрові струми шляхом розміщення його далі від залізничної колії. Вихідна потужність експерименту

зменшувалася з 5,05 до 1,6 Вт при перенесенні МФЕГ з відстані 48 мм на 190 мм, де втрати на вихрові струми були незначними.

У цій роботі представлено реалізацію ізотропного лічильника на основі надзвичайно низької частоти (ELF) IoT. Запропонований недорогий вимірювальний прилад може вимірювати щільність магнітного потоку від 100 нТл за допомогою трьох ідентичних датчиків для вимірювання ізотропного поля в площинах X, Y та Z, покращуючи роботу в [40]. Пропонований пристрій має майже плоску характеристику в діапазоні частот від 40 до 10 кГц, виявляючи та вимірюючи декілька джерел магнітного поля, включаючи мережу електропостачання загального користування та її гармонічні частоти. У нашому підході плата Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 використовується для передачі даних із датчика в хмару як повне рішення IoT, що підтримується програмою Blynk через операційні системи Android та iOS або веб-інтерфейс. Крім того, у нашому дослідженні також була запропонована схема збору енергії ELF (EH) для використання змінних магнітних полів (50 Гц), отриманих від роботи кількох споживчих пристроїв, таких як трансформатори, джерела живлення, фени для волосся тощо, з використанням низької потужності. -додатки споживання.

Індукована електрорушійна сила в будь-якому замкнутому контурі дорівнює негативній швидкості зміни магнітного потоку в контурі відповідно до закону електромагнітної індукції Фарадея. Отже, коли магнітний потік проходить через котушку, на ній генерується напруга, величина якої залежить від інтенсивності поля та площі закритої поверхні. З математичної точки зору,

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -A N \frac{dB}{dt}, \quad (2.4)$$

де Φ — магнітний потік, що проходить через котушку, A — площа, охоплена кожним витком котушки, N — загальна кількість витків котушки, B — щільність магнітного потоку поля (магнітного поля), t це час. По суті, похідна від щільності магнітного потоку за часом визначає швидкість зміни щільності магнітного потоку (похідна від магнітного потоку за часом).

Вважається, що в космосі існує гармонічне (синусоїдальне) магнітне поле такого виду:

$$B(t) = B_0 \cos(2\pi ft), \quad (2.5)$$

де $B(t)$ — миттєве значення індукції магнітного поля (функція часу), B_0 — максимальне значення коливального поля, f — частота коливань. З (2.4) і (2.5) робимо висновок, що якщо котушку помістити в гармонійне поле, то на її затискачах буде індукована гармонічна напруга $E(t)$, яка дорівнюватиме:

$$E(t) = 2\pi f A N B_0 \sin(2\pi f t) . \quad (2.6)$$

Спостерігаємо, що індукована напруга пропорційна геометричним характеристикам котушки (A, N), частоті f і напруженості поля B_0 . Гармонічний член $\sin(2\pi f t)$ вказує на те, що напруга є гармонічною функцією часу та має різницю фаз 90° відносно поля. З (6) ми бачимо, що якщо індуковану напругу E можна виміряти, поле B можна обчислити, якщо відома точна частота f . На практиці при вимірюванні магнітного поля довільного (невідомого) джерела його частота невизначена. Проблема невідомої частоти вирішується множенням обох частин рівняння (7) на абсолютне значення члена $G / G2\pi f$, де G є константою для будь-якої конкретної частоти f , що відповідає посиленню напруги підсилювача. Тоді ми матимемо:

$$\left| \frac{G}{2\pi f} \right| E(t) = G A N B_0 \sin(2\pi f t) . \quad (2.7)$$

За налаштуванням:

$$V(t) = |G/2\pi f| E(t)$$

отже,

$$V(t) = G A N B_0 \sin(2\pi f t) = G A N B(t) , \quad (2.8)$$

де $V(t)$ — миттєве значення гармонічної напруги, індукованої в котушці, як добуток на абсолютне значення члена $G / 2\pi f$. Посилаючись на середньоквадратичні значення (середньоквадратичні значення), середньоквадратична напруга (V_{rms}) пропорційна середньоквадратичному щільності магнітного поля (B_{rms}) і не залежить від частоти [31, 32]:

$$V_{rms} = G A N B_{rms} . \quad (2.9)$$

Тому легко обчислити густину магнітного потоку (V_{rms}), вимірявши значення напруги (V_{rms}) за допомогою аналогового електронного пристрою,

тобто вимірювача щільності магнітного потоку. На рисунку 2.3 показана блок-схема запропонованого недорогого вимірювача щільності магнітного потоку IoT, який надає хмарні послуги, як порівняльну перевагу серед аналогічного дорогого вимірювального обладнання [43]. Електронна схема запропонованого вимірювача щільності магнітного потоку проста в реалізації, а компоненти мають низький допуск для мінімізації похибок вимірювань. Котушка детектора з чітко визначеними геометричними характеристиками як датчик поля, підсилювач з посиленням напруги, рівним $G/2\pi f$, середньоквадратичний детектор і дисплей напруги необхідні для реальної схеми, яка використовує рівняння (2.9).

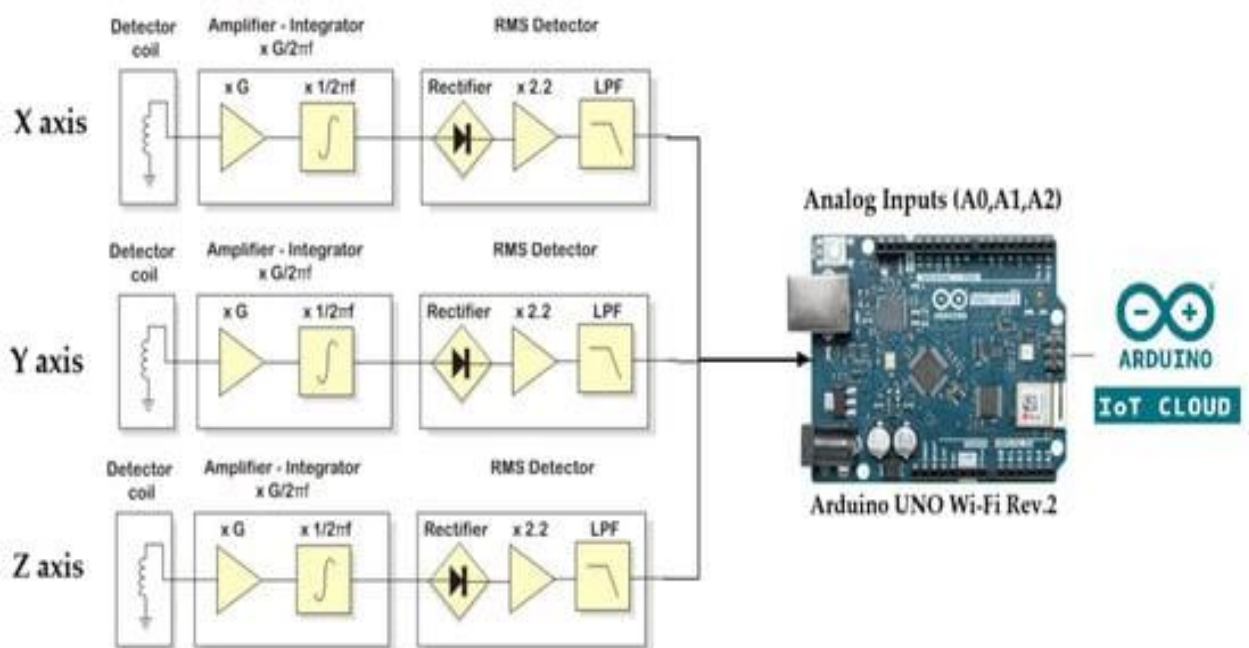


Рисунок 2.3 – Блок-схема запропонованого ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку на основі IoT. Плата Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 використовується для забезпечення 3 аналогових входів для вимірювань по осях X , Y і Z і підключення Wi-Fi, покращуючи попередню версію датчика

У запропонованій реалізації плата Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 [43] використовується замість звичайних вольтметрів на аналогових виходах пристрою, забезпечуючи підключення до мережі для передачі даних у хмару Blynk [44], як повний IoT EMF рішення. Виміряні значення напруги на трьох аналогових входах відповідають значенням напруженості магнітного поля по осях X , Y і Z , відповідно, і можуть відображатися на будь-якому мобільному пристрої з підключенням Wi-Fi.

2.2 Розробка підсилювача з підсиленням $G/2\pi f$ та детектора RMS

Схема з відгуком $1/f$ є інтегратором [45] (фільтр низьких частот з лінійною амплітудною характеристикою та ідеальною частотою зрізу 0 Гц). За допомогою операційного підсилювача і кількох пасивних компонентів можна створити майже ідеальний інтегратор. Для досягнення високого значення коефіцієнта посилення потрібен один інтегратор із високим коефіцієнтом посилення або декілька підсилювальних каскадів, з'єднаних послідовно з інтегратором із прийнятним коефіцієнтом посилення. Другий підхід, у якому підсилювач використовується перед інтегратором, рекомендований для запропонованої схеми. Детектор вимагає високого підсилення, щоб бути чутливим без використання будь-якої масивної котушки (оскільки вихідна напруга для котушки розумного розміру відносно мала, зокрема на низьких частотах).

Секція середньоквадратичного детектора потрібна для впровадження вимірювача магнітного поля, який може вимірювати середньоквадратичне значення поля замість середніх або пікових значень. Випрямляч використовується для вилучення компонента постійного струму та вимірювання середньоквадратичного значення вихідного сигналу змінного струму інтеграторів.

Показано, що компонент постійного струму випрямленого сигналу прямо пропорційний середньоквадратичному значенню вхідного гармонічного сигналу. Напівхвильова випрямлена напруга V_s розглядається протягом повного циклу ($0-2\pi$ рад):

$$\begin{aligned} V_s(t) &= V_m \sin(\omega t) & \text{for } 0 \leq \omega t < \pi \\ V_s(t) &= 0 & \text{for } \pi \leq \omega t < 2\pi \end{aligned} \quad (2.10)$$

де V_m - максимальне значення півхвилі випрямленої напруги. Ряд Фур'є попередньої функції має вигляд [46]:

$$V_s(t) = \frac{V_m}{\pi} + \frac{V_m}{2} \sin(\omega t) - \frac{2V_m}{3\pi} \cos(2\omega t) - \frac{2V_m}{15\pi} \cos(4\omega t) + \dots \quad (2.11)$$

і отже,

$$V_s(t) = \frac{V_m}{\pi} + \frac{V_m}{2} \sin(\omega t) + \sum_{N=2}^{\infty} \frac{V_m [1 + (-1)^N]}{\pi(1 - N^2)} \cos(N\omega t) \quad (2.12)$$

Крім того, ми знаємо, що в півхвильовому випрямленому сигналі:

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{out}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) dt = \frac{V_m}{\pi} \quad (2.13)$$

і,

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{out}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_m^2 \sin^2\left(\frac{2\pi t}{T}\right) dt} = \frac{V_m}{2} \quad (2.14)$$

Перший член у (2.11) представляє компонент постійного струму напіввипрямленого сигналу, другий член є першою гармонікою (базова частота), а решта членів є гармоніками вищого порядку відповідно. У гармонійному (синусоїдальному) сигналі передбачається наступне:

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \quad V_{DC} = \frac{\sqrt{2} V_{rms}}{\pi}, \quad V_{rms} = \frac{\pi V_{DC}}{\sqrt{2}} \quad (2.15)$$

Середньоквадратичне значення вхідного гармонічного сигналу дорівнює $\pi/\sqrt{2}$ постійної складової напіввипрямленого сигналу. На виході випрямляча (V_{out}), окрім постійної складової, велика кількість гармонік повинна бути відхилена. Фільтр низьких частот можна використовувати для подавлення гармонійних частот. Щоб досягти ідеального придушення гармонік, частота зрізу фільтра низьких частот повинна бути якомога нижчою. Отже, RMS детектор може бути реалізований, що складається з півхвильового випрямляча та фільтра нижніх частот.

2.3 Електронна схема пропонованого вимірювача щільності магнітного потоку ЕМП

На рис. 2.4 представлена принципова електронна схема запропонованого вимірювача магнітного поля (аналогова ділянка).

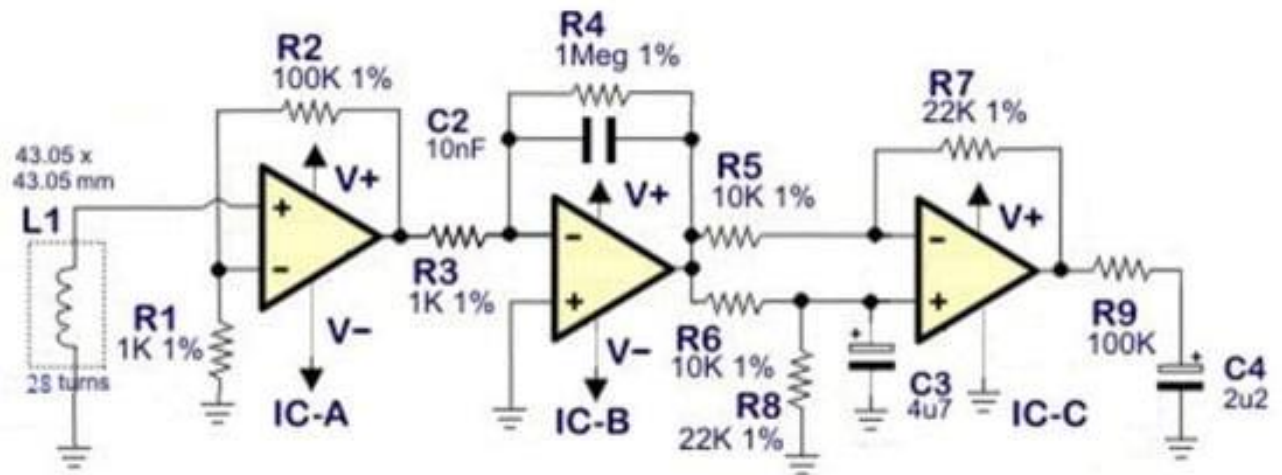


Рисунок 2.4 – Принципова електронна схема запропонованого вимірювача магнітної індукції. Для реалізації ізотропного лічильника також необхідні 3 ідентичні схеми для вимірювання КНЧ в площинах X, Y і Z

Операційний підсилювач А використовується як типовий неінвертуючий підсилювач із коефіцієнтом посилення G :

$$G_a = 1 + \frac{R_2}{R_1} . \quad (2.16)$$

Підсилення G_a визначається R_1 і R_2 , як описано в рівнянні (16); воно дорівнює 101 і не залежить від частоти. На практиці коефіцієнт підсилення підсилювача буде менше 101 для частот нижче 40 Гц. Конструктивні характеристики операційного підсилювача А обмежують чутливість підсилювача на вищих частотах (добуток посилення на смугу пропускання). Тим не менш, від 40 Гц до 10 кГц характеристика підсилювача майже плоска, а посилення приблизно дорівнює теоретичному значенню з потенційною похибкою менше 1 дБ, якщо для R_1 і R_2 використовуються резистори з точністю 1% . Інтегратор слідує за підсилювачем, реалізованим з операційного підсилювача В, R_4 , R_3 і C_2 . Відгук інтегратора обернено пропорційний частоті, обумовленої C_2 . Якщо інтегратор аналізувати як типовий інверсний підсилювач, то видно, що його посилення G_b дорівнює

$$G_b = -\frac{R_F}{R_3} . \quad (2.17)$$

Значення R_F – це повний опір, що виникає в результаті паралельної комбінації резистора R_4 і імпедансу X_c (реактивного опору) C_2 . Тобто,

$$R_F = X_c // R_4 = R_4 X_c / (R_4 + X_c) . \quad (2.18)$$

Знаючи, що реактивний опір X_c дорівнює:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f \cdot C_2} . \quad (2.19)$$

Комбінуючи рівняння (2.17)–(2.19), ми знаходимо, що:

$$G_b = \left(-\frac{R_4}{R_3} \right) / (1 + 2\pi f R_4 C_2) . \quad (2.20)$$

Слід помітити, що наведене вище рівняння не має точної форми $1/f$, головним чином тому, що наш інтегратор не ідеальний через R_4 . Тим не менш, добуток $2\pi f R_4 C_2$ набагато більший за 1 для частот вище 40 Гц, тому «1» у знаменнику можна опустити. Отже, для частот вище 40 Гц коефіцієнт підсилення інтегратора дорівнює:

$$G_b = \left(-\frac{1}{R_3 C_2} \right) \left(\frac{1}{2\pi f} \right) . \quad (2.21)$$

Загальне підсилення ланцюга підсилювача та інтегратора буде добутком G_a та G_b , а саме:

$$G_t = G_a \cdot G_b . \quad (2.22)$$

З рівнянь (2.16), (2.21) і (2.22) можна зробити висновок, що:

$$G_t = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(-\frac{1}{R_3 C_2} \right) \frac{1}{2\pi f} , \quad (2.23)$$

де:

$$G = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(-\frac{1}{R_3 C_2} \right) . \quad (2.24)$$

Беручи до уваги рівняння (2.24) і (2.9), ми спостерігаємо, що на виході інтегратора утворюється напруга змінного струму (V_{rms}), яка дорівнює

$$V_{rms} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(-\frac{1}{R_3 C_2}\right) A N B_{rms} . \quad (2.25)$$

З рівняння (2.25) ми помічаємо, що вироблена напруга прямо пропорційна полю і не залежить від частоти, як показано на рисунку 2.5 . Виходячи з розрахунку фактичного значення константи G , ми спостерігаємо це

$$G = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(-\frac{1}{R_3 C_2}\right) = 101 \times 10^5 . \quad (2.26)$$

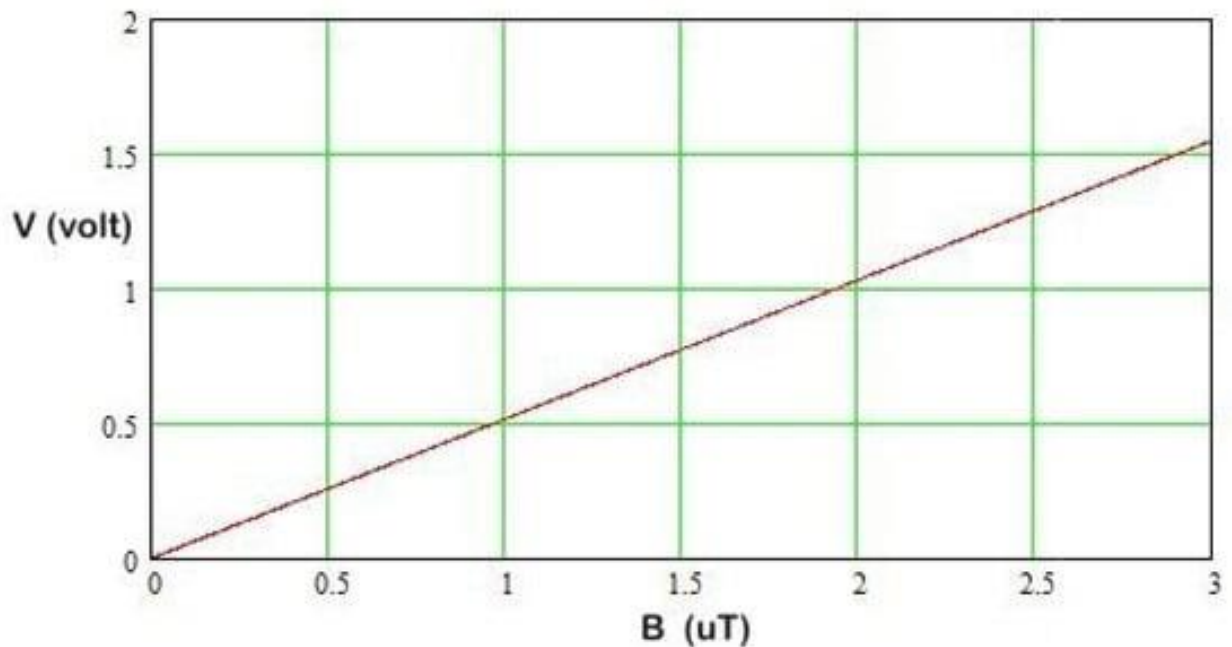


Рисунок 2.5 – Вихідна напруга запропонованого RMS детектора є функцією щільності магнітного потоку

Схема випрямляча є наступною за інтегратором, реалізованим з операційного підсилювача С. Оскільки ніде немає діода, схема випрямлення є незвичайною. Випрямлення проводиться тому, що негативний півперіод сигналу просто обрізається. Операційний підсилювач С разом із резисторами R_5 , R_6 , R_7 та R_8 є типовою схемою диференціального підсилювача (віднімання). Напруга, прикладена до лівого кінця R_5 , віднімається від напруги, прикладеної до лівого кінця R_6 . На виході від'ємника завжди буде напруга, що дорівнює нулю, оскільки ліві кінці R_5 і R_6 замкнуті накоротко, лише у випадку постійного струму. Навпаки, для сигналу змінного струму конденсатор C_3 діє як коротке

замикання та заземлює неінвертуючий вхід операційного підсилювача С. Цей метод перетворює від'ємник на інвертуючий підсилювач змінного *струму* з посиленням $R_7 / R_5 = 2,2$.

Попередній аналіз показує, що операційний підсилювач С усуває компонент постійного струму сигналу та підсилює решту сигналу змінного струму в 2,2 рази. Крім того, операційний підсилювач С виконує напіввипрямлення сигналу на опорному рівні 0 В без негативної напруги живлення.

Отже, він може посилювати лише позитивний напівперіод сигналу, а під час негативного напівперіоду його вихід дорівнює нулю (тобто відбувається випрямлення напівфази). Вихід ОУ С виробляє напіввипрямлений сигнал, що містить компонент постійного струму та деякі гармоніки (згідно з аналізом рядів Фур'є, згаданим вище). Гармоніки відфільтровуються з простого фільтра низьких частот, утвореного R_9 і C_4 . Частота зрізу цього спеціального фільтра дорівнює $1/2\pi R_9 C_4 = 4,5$ Гц, що є дуже низькою частотою, і фільтр пропускає лише компонент постійного струму. Зазвичай компонент постійного струму напіввипрямленого сигналу дорівнює $\sqrt{2}/\pi$ середньоквадратичного значення вхідного сигналу випрямляча. Термін $\sqrt{2}/\pi$ дорівнює приблизно 1/2,2.

Однак, оскільки ми використовуємо підсилення, що дорівнює 2,2 у випрямлячі, ми змушуємо напіввипрямлений сигнал мати компонент постійного струму, що дорівнює точному середньоквадратичному значенню вхідного сигналу (шляхом скасовування коефіцієнта 1/2,2). Схема має аналоговий вихід, що забезпечує напругу 0,1 мВ/нТ на аналогово-цифровому порту (ADC) плати Arduino WeMos D1. Наприклад, для поля 2 мкТ на аналоговому виході вимірювача ELF буде напруга 200 мВ. Цей вихід забезпечується на клеммах C_4 . C_4 разом із R_9 утворює фільтр низьких частот, який вилучає компонент постійного струму з виходу випрямляча, як описано вище.

2.4 Реалізація ізотропного датчика ELF

Намотування котушки з певною кількістю витків і конкретними розмірами може становити зонд магнітного поля вимірювача ELF. Припустимо, що V_{rms} має становити 1,2 В, коли котушку поміщають у магнітне поле 2,3 мкТл (RMS). Відповідно до (2.25) має виконуватися рівняння:

$$A N = 0.05166 \text{ m}^2 . \quad (2.27)$$

У нашій початковій реалізації прототипу [40], вибравши котушку зі 100 витками, кожен виток повинен включати площу $516,6 \times 10^{-6} \text{ м}^2$. Бажана площа котушки прямокутного перерізу може бути досягнута, якщо кожен виток становить $43,05 \text{ мм} \times 12 \text{ мм}$. Таким чином, котушка лічильника в початковій конструкції складалася зі 100 витків прямокутного перерізу $43,05 \text{ мм} \times 12 \text{ мм}$.

У цьому дослідженні датчик запропонованого лічильника складається з трьох ідентичних квадратних зондів у вертикальному центрі, що забезпечує вимірювання ізотропного H -поля в площинах X , Y та Z відповідно, як показано на рисунку 2.6. Кожен зонд також повинен задовольняти рівнянням (25) і (27), враховуючи, що початкові розміри повинні бути відповідним чином змінені для досягнення кубічної структури запропонованого ізотропного датчика. Котушка кожного осьового датчика складається з 28 витків квадратного перерізу $43,05 \text{ мм} \times 43,05 \text{ мм}$ для живлення ідентичних електронних схем лічильника (рис. 2.6 b).

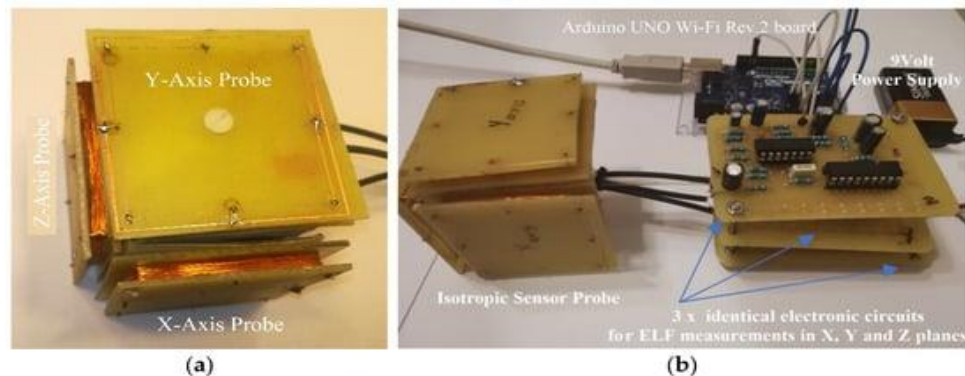


Рисунок 2.6 – (а) Сенсорна реалізація запропонованого вимірювача ELF складається з трьох ідентичних квадратних зондів у вертикальному вирівнюванні, що забезпечує вимірювання ізотропного H -поля в площинах X , Y та Z . (б) Основними частинами запропонованого вимірювача магнітного поля є ізотропні зонди, плата Arduino та ідентичні електронні схеми.

Виміряне падаюче магнітне поле запропонованого датчика з трьома однаковими квадратними котушками визначається наступним рівнянням [14]:

$$|H_{inc}| = \sqrt{k_x V_x^2 + k_y V_y^2 + k_z V_z^2} , \quad (2.28)$$

де V_x , V_y та V_z — напруги на виходах датчикових котушок лічильника, а k_x , k_y та k_z — відповідні коефіцієнти, отримані в результаті калібрування пристрою порівняно з іншими доступними лабораторними методами. каліброване обладнання, як Narda PMM ENP-50C.

Для перевірки частотної характеристики системи використовувався функціональний генератор TTI TG230 для живлення пари котушок Гельмгольца для забезпечення однорідного магнітного поля в лабораторії. Підтримуючи постійну амплітуду сигналу генератора (і в той же час інтенсивність випромінюваного магнітного поля близько 2 мкТл), робоча частота генератора змінювалася в діапазоні КНЧ (1 Гц–100 кГц) для досягнення кривої АЧХ запропонованого лічильника, як показано на рисунку 2.7а. Експериментальні вимірювання показують майже плоский відгук у діапазоні частот від 40 Гц до 10 кГц, як показано на рисунку 2.7 б відповідно. У таблиці 2.2 показано порівняння запропонованого лічильника з аналогічними високоточними та наддорожчими рішеннями вимірювального обладнання СНЧ.

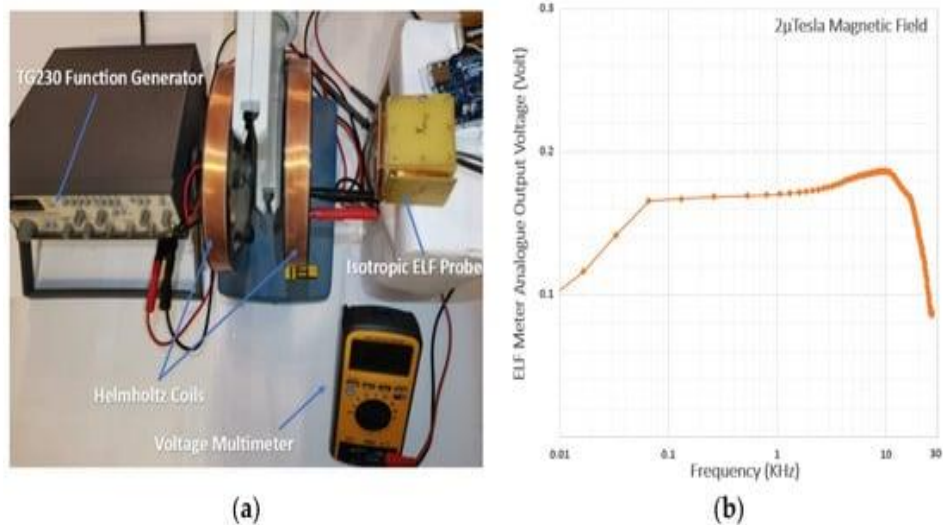


Рисунок 2.7 – (а) Перевірка частотної характеристики через використання котушок Гельмгольца, що живляться генератором сигналу для забезпечення однорідного магнітного поля в діапазоні ELF. (б) Крива частотної характеристики лічильника

Таблиця 2.2. Порівняння запропонованого лічильника з аналогічними рішеннями вимірювання КНЧ.

Ref.	Freq. Response	Meas. Level	Connectivity	Type of Meas.
PMM EHP-50C [13]	5 Hz–100 kHz	1 nT–10 mT	Opt./USB	Magnetic/Electric Field
Narda EHP-50F [38]	1 Hz–400 kHz	0.3 nT–10 mT	Opt./USB	Magnetic/Electric Field
Narda EFA-300 [14]	5 Hz–32 kHz	1 nT–31.6 mT	Opt./Serial	Magnetic/Electric Field
Study in [9]	300 kHz–100 MHz	125 nT–20 mT	Not Mentioned	Magnetic Field
Study in [10]	<100 kHz	Not Mentioned	Not Mentioned	Magnetic/Electric Field
TM192D [39]	30 Hz–20 kHz	up to 200 μ T	USB	Magnetic Field
This work	40 Hz–10 kHz	100 n–10 μ T	WiFi, IoT (Blynk)	Magnetic Field

2.5 Додаток IoT з платою Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 для моніторингу поля ELF у реальному часі

Значення виміряного магнітного поля можна відображати в режимі реального часу на будь-якому мобільному пристрої з підключенням до Wi-Fi за допомогою програми Blynk [44], що підтримується платформами Android та iOS. Плата Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 із вбудованим модулем Wi-Fi Nina [43] використовується для забезпечення трьох аналогових входів (АЦП) для вимірювань по осях X , Y та Z відповідно для передачі даних із лічильника до хмари як повне рішення EMF IoT [37], як показано на рисунку 2.8. Arduino Uno WiFi використовує 8-розрядний мікропроцесор і вбудований інерціальний вимірювальний блок (IMU). Його аналого-цифровий перетворювач (АЦП) має 10-бітну роздільну здатність, відображаючи вхідну напругу від 0 до 5 В у цілі значення від 0 до 1023. Це призводить до зчитування 4,9 мВ на одиницю (5 В/1024) на Arduino UNO.

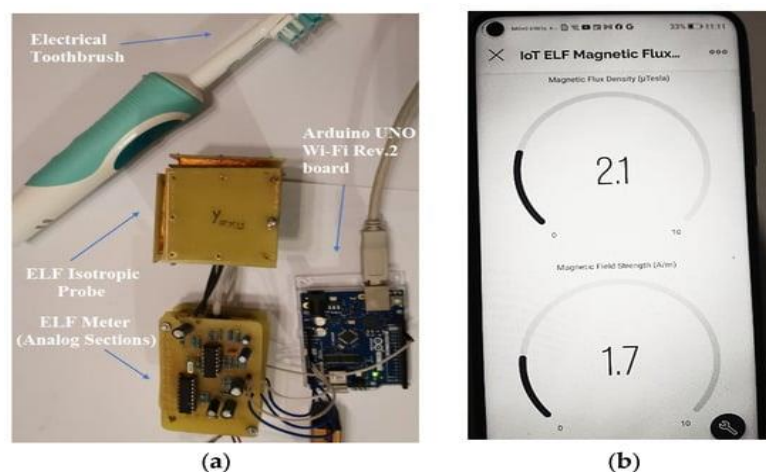


Рисунок 2.8 – (а) Вимірювання впливу магнітного поля на електричну зубну щітку за допомогою запропонованого вимірювача на основі Інтернету речей.

(б) Значення ізотропної напруженості поля ELF (в $A / м$ і $мкТесла$) відображаються в додатку Blynk, що підтримується платформою Android у мобільному телефоні з підключенням Wi-Fi, як повне рішення IoT

Інтерфейс користувача Blynk можна одночасно відобразити на мобільному терміналі або веб-порталі, а також напруженість магнітного поля H (А/м) і відповідну щільність потоку B (мкТесла) за допомогою такої формули перетворення:

$$B(Tesla) = \mu_r \mu_0 H(A/m), \quad (2.29)$$

де μ_r – відносна, а μ_0 – магнітна проникність вільного простору. У більшості країн світу рівень магнітного поля до 300 нТл вважається безпечним. Кілька досліджень показали, що поле вважається потенційно шкідливим від 400 нТл до 1 мкТл і небезпечним від 1 мкТл і вище [2 , 23]. Крім того, користувачеві доступний процентний внесок магнітного поля (%) кожного зонда, щоб визначити напрямки площини (X, Y або Z) падаючого магнітного поля.

2.6 Збір енергії магнітного поля (MF-EH) від роботи електричних пристроїв комерційного використання

Декілька електричних пристроїв, таких як трансформатори, електродвигуни блоків живлення, фени тощо, створюють потужні низькочастотні магнітні поля, здатні забезпечувати живлення програм із низьким споживанням (наприклад, датчиків WSN). У цьому розділі нашого дослідження також пропонується схема збору енергії магнітного поля (MF-EH) для використання магнітного поля частотою 50 Гц, отриманого від цих звичайних електричних пристроїв на коротких відстанях. Запропонований збирач енергії ELF базується на схемі налаштування LC з такою самою частотою власного резонансу (f_{SRF}), що й у мережі електропостачання (50 Гц). Кореляція між резонансною частотою (f_{SRF}) контуру та значеннями настроювального конденсатора (C_{tun}) і котушки індуктивності (L_{tun}), відповідно, визначається рівняннями Томсона (2.30) і (2.31):

$$C_{tun} = \frac{1}{4\pi^2 f_{SRF}^2 L_{tun}} \quad (2.30)$$

і таким чином

$$L_{tun} = \frac{1}{4\pi^2 f_{SRF}^2 C_{tun}}. \quad (2.31)$$

Коефіцієнт добротності (Q) схеми становить близько 6,7, як розраховано за рівнянням (2.32), як схема послідовного налаштування, де

значення опору котушки ($R_{\text{котушки}}$) становить приблизно 160 Ом. Для досягнення резонансу на надзвичайно низьких частотах (ELF) потрібне відносно високе значення або ємності, або індуктивності котушки. Більше значення індуктивності робить запропоновану схему більш чутливою до збору енергії від змінних магнітних полів частотою 50 Гц.

$$Q = \frac{2\pi f_{\text{SRF}} L_{\text{tun}}}{R_{\text{coil}}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{SRF}} R_{\text{coil}} C_{\text{tun}}} = \frac{1}{R_{\text{coil}}} \sqrt{\frac{L_{\text{tun}}}{C_{\text{tun}}}}. \quad (2.32)$$

Для нашої реалізації було вибрано значення 3,4Н для індуктивності, досягнутої сотнями витків ізольованого мідного дроту діаметром 0,3 мм у поєднанні з додаванням залізного сердечника в резонансну котушку, як показано на рисунку 2.9 а. Таким чином, номінал конденсатора (C_{tun}) схеми налаштування повинен становити приблизно 2,9 мкФ, щоб досягти коливань на резонансній частоті 50 Гц. Параметричне дослідження компонентів було проведено в лабораторії, реєструючи генезис спадних коливань за допомогою цифрового осцилографа до досягнення бажаної резонансної частоти 50 Гц (f_{SFR}), як показано на рисунку 2.9 с.

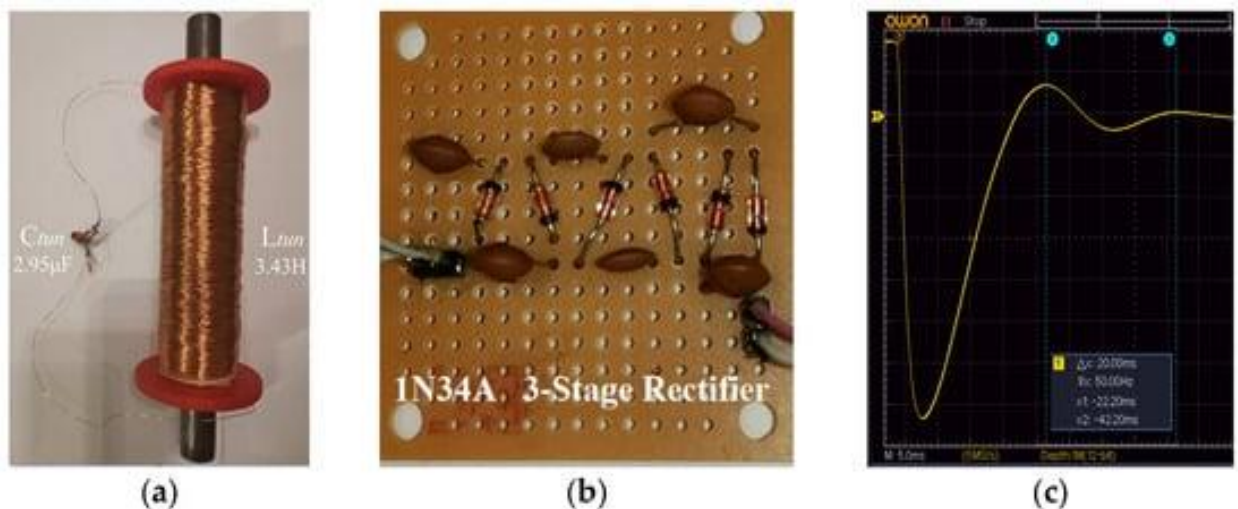


Рисунок 2.9 – (а) Котушка схеми налаштування LC запропонованого комбайна ELF виконана сотнями витків ізольованого мідного дроту діаметром 0,3 мм для досягнення резонансної частоти 50 Гц. (б) 3-ступеневий випрямляч Кокрофта-Уолтона. (с) Генезис спадаючого коливання з використанням цифрового осцилографа в лабораторії для точного налаштування резонансної частоти на 50 Гц

Запропонована схема була випробувана для збору енергії змінного магнітного поля від електричних пристроїв, таких як трансформатори, джерела живлення тощо в лабораторії. Вихід налаштованої схеми LC вказує

на випрямляч запропонованої системи. 3-каскадний випрямляч Кокрофта-Уолтона на основі германієвого діода (1N34A) [46] з блокуючими конденсаторами 100 нФ використовувався для перетворення постійного струму, як показано на рисунку 2.9b. У прототипі також передбачена можливість моніторингу вихідної напруги кожного каскаду випрямляча для отримання додаткових експериментальних вимірювань і вибору найбільш ефективної кількості каскадів у контрольних точках від 1 до 3 відповідно. Як уже згадувалося, інтенсивність магнітного поля зменшується зі збільшенням відстані від полів, викликаних котушками, магнітами або трансформаторами, в $1/r^3$, що призводить до падіння напруги збору відповідно. Для компенсації цього обмеження підвищувальний перетворювач постійного струму Texas Instruments BQ22504 [47] можна використовувати як додатковий ступінь системи для необхідного підвищення напруги, що забезпечує живлення пристроїв з низьким споживанням, як показано на блок-схемі на рисунку 2.10. BQ22504 — це високоефективний підвищувач із наднизьким енергоспоживанням, призначений для використання в системах збору енергії. Цей пристрій було створено з ефективністю в отриманні та управлінні від мікроват (мкВт) до міліват (мВт) потужності, виробленої кількома джерелами постійного струму. Доцільно почати з V_{IN} від 600 мВ і продовжувати збір енергії, поки V_{IN} не стане вищим або дорівнюватиме 130 мВ. Накопичувальний конденсатор (C_s) ємністю 100 мкФ розміщується для зберігання енергії, отриманої від джерел магнітного поля, як система ЕН на основі конденсаторів [43], що живить підвищувальний перетворювач BQ22504 для живлення програм із низьким споживанням.

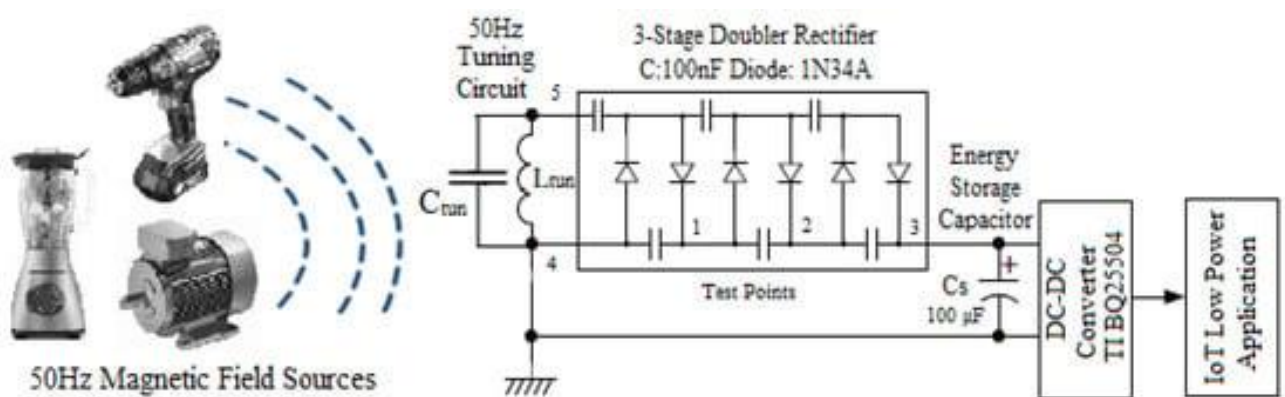


Рисунок 2.10 – Електронна схема запропонованої системи збору енергії ELF і деяких джерел магнітного поля. Тестові точки 1, 2 і 3 відповідають окремим ступеням випрямляча

2.7 Експериментальні дослідження MF-ЕН

Експериментальні вимірювання показали, що на відносно близькій відстані від досліджуваного магнітного джерела (фена) напруга збору (постійного струму) може досягати 4,2 вольт, як показано на рисунку 2.11b . Накопичувальний конденсатор (C_s) системи можна повністю зарядити за 3 хвилини магнітним полем 33 мкТ, викликаним роботою електричного фена, як показано на рисунку 2.12 і рисунку 2.11a відповідно. Криві зарядки накопичувального конденсатора (C_s) демонструють, що максимальна зарядна напруга (V_{max}) пропорційна напруженості навколишнього магнітного поля, як показано на рисунку 2.12 . Динамічна поведінка випрямних діодів значною мірою залежить від рівнів отриманого сигналу, що, відповідно, впливає на еквівалентний опір схеми випрямляча ($R_{thevenin}$), зі зміною постійної часу зарядки (t_{charge}) як кінцевий результат. . Експериментальні вимірювання також були поширені на використання змінного магнітного поля поблизу підстанцій середньої напруги електричної мережі загального користування. По-перше, було проведено вимірювання напруженості магнітного поля по периметру металевої кабіни, де проходять лінії електропередач розподільної мережі, за допомогою вимірювача поля Narda ENP-50C PMM, що виявляє значення магнітного поля до 60 мкТл (у піковий час протягом міське середовище). Експериментальна установка створила напругу (розімкненого ланцюга), яка сягала 8 Вольт у точках, де щільність магнітного поля була максимальною, як показано на рисунку 2.13 а, б відповідно. Слід зазначити, що напруга збирання є функцією просторового розміщення схеми налаштування пристрою, оскільки неможливо ізотопно зібрати енергію за допомогою оригінальної конструкції прототипу (осі X , Y , Z).



Рисунок 2.11 – (а) Значення опроміненої щільності магнітного потоку може досягати 33 мкТл поблизу звичайного фена, як показано на аналізаторі Narda PMM ENP-50C. (б) Експериментальні вимірювання показали, що напруга збирання (постійного струму) може досягати до 4,2 вольт від цього значення магнітного поля за допомогою запропонованої системи MFЕН

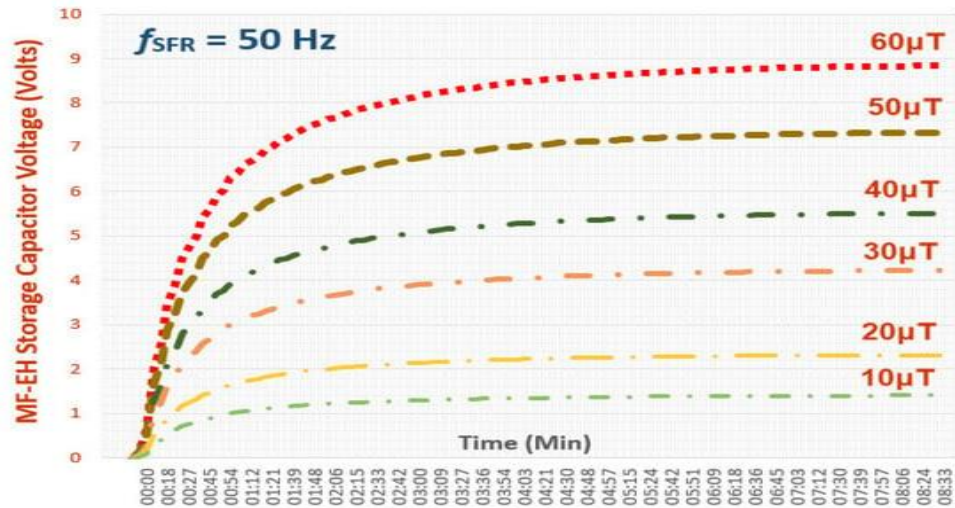


Рисунок 2.12 – Криві зарядки накопичувального конденсатора (100 мкФ) як функція інтенсивності мінливого магнітного поля (50 Гц) середовища. Максимальна напруга (V_{max}) накопичувального конденсатора залежить від інтенсивності магнітного поля, що також впливає на постійну часу зарядки



(a)



(b)

Рисунок 2.13 – (а) Напруга збору становить до 8 Вольт біля металевої kabini в підстанції середньої напруги загальної розподільчої мережі електропостачання з використанням запропонованого MF-EH. (б) Середнє значення щільності магнітного потоку становить близько 34 мкТл, як показали експериментальні вимірювання в металевій kabini підстанції середньої напруги в міській мережі в години пік

2.8 Висновки до розділу

Це дослідження представляє реалізацію ізотропного лічильника на основі надзвичайно низької частоти (ELF) IoT. Прототип схеми може вимірювати

щільність магнітного потоку від 100 нТл до 10 мкТл за допомогою 3 квадратних ідентичних сенсорних зондів у вертикальному вирівнюванні, забезпечуючи вимірювання ізотропного поля в площинах X, Y та Z. Лічильник має плоску характеристику в робочому діапазоні частот від 40 Гц до 10 кГц. Запропонований недорогий прилад може вимірювати всі магнітні поля від таких джерел, як трансформатори, електродвигуни, обігрівачі, фени та мережу живлення, а також їх гармонічні частоти. Плата Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 з інтегрованим модулем WiFiNINA відповідає за передачу даних від датчика до хмари, як повне рішення IoT. Виміряне поле можна відобразити на будь-якому мобільному пристрої з підключенням Wi-Fi, що підтримується програмою Blynk через операційні системи Android та iOS або веб-інтерфейс. Як майбутній аспект, покращена версія запропонованого ізотропного вимірювача може бути використана для реалізації розподіленої мережі датчиків EMF IoT для віддаленого моніторингу впливу магнітного поля ELF у цікавій зоні високого ризику. Крім того, функція Arduino FFT також може відобразити виміряну напруженість магнітного поля в межах його гармонійних частот у майбутній покращеній реалізації. Наявність магнітних полів у міських і напівміських районах може бути використана як аварійне резервне джерело енергії для живлення електронних пристроїв з низьким споживанням, таких як датчики Інтернету речей (IoT). У нашому дослідженні також було представлено реалізацію схеми збору енергії ELF (ЕН) для використання змінного магнітного поля (50 Гц), отриманого від роботи трансформаторів, джерел живлення та інших споживчих пристроїв як у лабораторії, так і в ближньому відстань підстанцій середньої напруги електричної мережі загального користування. Експериментальні вимірювання показали, що напруга збирання (постійного струму) може досягати до 4,2 вольт з магнітним полем 33 мкТ, яке спричинено роботою електричного фена, і може повністю зарядити накопичувальний конденсатор (C_s) 100 мкФ запропоновану систему ЕН приблизно за 3 хв. Використання більш високого значення індуктивності котушки (з одночасним зміною ємності конденсатора) створює більш чутливу схему для ефективної енергії, отриманої від магнітних полів пристроїв, що працюють на частоті мережі (50 Гц).

З МОНІТОРИНГ СТАНУ АКТИВНИХ МАГНІТНИХ ПІДШИПНИКІВ В ІНТЕРНЕТІ РЕЧЕЙ

Магнітний підшипник - це промисловий пристрій, який підтримує обертовий вал за допомогою магнітного поля. Магнітні підшипники мають такі переваги, як висока ефективність, низькі витрати на обслуговування та відсутність мастила. В активних магнітних підшипниках (АМВ) використовуються електромагніти з активно керованими струмами котушки на основі положення ротора, що контролюється датчиками, вбудованими в АМВ. АМВ підходять для Інтернету речей (ІоТ) завдяки своїм вбудованим датчикам і приводам. ІоТ — це взаємозв'язок фізичних пристроїв, який дозволяє їм надсилати та отримувати дані через Інтернет. Технологія ІоТ останнім часом стрімко розвивається і використовується для промислових пристроїв. У цьому дослідженні розроблено метод моніторингу стану систем АМВ в режимі онлайн з використанням готової технології ІоТ. Оскільки використовувалися готові рішення ІоТ, розроблений метод є економічно ефективним і може бути реалізований на існуючих системах АМВ. У цьому дослідженні тестова установка МВС500 АМВ була оснащена одноплатним комп'ютером Raspberry Pi. Raspberry Pi контролює датчики положення АМВ і датчики струму через аналого-цифровий перетворювач. Кілька випадків навантаження було накладено на експериментальний випробувальний стенд і діагностовано дистанційно за допомогою обчислень віртуальної мережі. Було виявлено, що віддалений моніторинг стану АМВ можливий менш ніж за 100 доларів США.

3.1 Активні магнітні підшипники

Активні магнітні підшипники (АМВ) підтримують ротор за допомогою магнітного поля таким чином, що ротор піднімається [51]. АМВ є альтернативою іншим типам підшипників, таким як підшипники кочення та підшипники з рідинною плівкою [52]. Підшипники АМВ мають переваги перед іншими типами підшипників, такі як потенціал підвищення ефективності та швидкості обертання. Крім того, АМВ не потребують змащування, що є перевагою в чистих приміщеннях, а також харчової або медичної обробки (наприклад, [53]). АМВ не потребують обслуговування та корисні в підводних [54] і космічних застосуваннях [55]. Контроль зазору повітряного зазору можна використовувати, наприклад, для позиціонування обробного інструменту [56] та активного балансування [57].

Пасивні магнітні підшипники використовують статори з постійними магнітами для відштовхування ротора постійними магнітами з протилежною поляризацією [58]. Система природно стабільна, прагнучи до рівноваги в центрі підшипника. Пасивні магнітні підшипники, як правило, більш ефективні, ніж АМВ з електромагнітами, оскільки немає споживання струму. Однак їм не вистачає вантажопідйомності та продуктивності активованих АМВ. АМВ зі зміщенням на постійних магнітах мають постійні магніти для забезпечення початкової тягової сили на феромагнітному роторі. АМВ із зміщенням постійного магніту слугують способом досягнення деяких переваг пасивних магнітних підшипників і АМВ і все ще використовують вбудовані датчики та виконавчі механізми [59]. АМВ з нульовим і низьким зміщенням також використовують вбудовані датчики та високоефективні приводи та вимагають складних законів керування (наприклад, [51-59]), щоб скористатися перевагами нелінійного потоку.

АМВ використовують електромагнітні приводи для створення сили тяжіння на феромагнітному роторі. Величина сили тяжіння зростає в міру наближення ротора до статора. Таким чином, налаштування є природним нестабільним і вимагає стабілізації зворотного зв'язку, щоб функціонувати. АМВ за своєю суттю включає певну форму визначення положення. Сигнал положення ротора використовується для розрахунку необхідного струму котушки для контролю положення ротора та досягнення стабільної левітації. Типовим типом датчика є безконтактний вихрострумний датчик положення. Датчики положення АМВ зручно використовувалися для онлайн-моніторингу стану [57]. Крім того, знання положення ротора та струму котушки в режимі реального часу можна використовувати для визначення опорних сил, які можна використовувати для опосередкованого моніторингу навантаження ротора [58].

АМВ проектують, будують і впроваджують інженери та техніки з експертними знаннями. Наприклад, конструкція контролера АМВ повинна бути налаштована відповідно до геометрії ротора через інерційну та гіроскопічну перехресну зв'язок і щоб уникнути збудження гнучких режимів. Після введення в експлуатацію на місці АМВ може використовуватися кінцевим користувачем з відносно невеликим навчанням [59]. Однак кінцевий користувач може бути не в змозі ефективно усунути ускладнення системи АМВ, які можуть виникнути після процесу введення в експлуатацію, оскільки кінцеві користувачі не навчені розпізнавати або діагностувати ці ускладнення. У таких випадках технік польового обслуговування від виробника оригінального обладнання АМВ (ОЕМ) повинен виїхати на місце для виконання обслуговування. Це призводить до простою системи, що

підтримується АМВ, і збільшення витрат для клієнта. Рішення полягає в тому, щоб зробити АМВ частиною Інтернету речей (IoT). Це дозволить підвищити продуктивність і знизити витрати.

Точне визначення та сфера застосування IoT все ще розробляється. Однак IoT в основному забезпечує взаємозв'язок фізичних пристроїв. Це взаємоз'єднання дозволяє пристроям надсилати й отримувати дані через Інтернет. Це дозволяє створювати цінності, що виходять за межі простої суми «функції, заснованої на речах» і «послуги, заснованої на IT» [60]. Розмістивши АМВ в IoT, віддалений користувач, наприклад сторонній технік ОЕМ, міг отримати доступ до АМВ і діагностувати несправності без необхідності огляду на місці. Тому (щоб зменшити або усунути час простою обладнання) технік ОЕМ може рекомендувати коригувальну дію негайно або навіть завчасно.

Перші приклади того, що стане відомим як IoT, були в області тегів радіочастотної ідентифікації (RFID) (наприклад, [52]). З тих пір IoT отримав великий розвиток через значний вплив на повсякденне життя людей [54]. Є кілька випадків, коли промисловість починає використовувати переваги технології IoT [53]. Зовсім недавно IoT був застосований для структурного моніторингу стану [54]. Наприклад, IoT використовувався для моніторингу положення сталі в процесі безперервного лиття [55]. Крім того, IoT використовувався для моніторингу вібрації в електродвигунах [56]. Це свідчить про потенціал АМВ у поєднанні з IoT.

Попередня робота над інструментами Інтернету речей, що використовуються для АМВ, проводилася раніше. Здебільшого це запатентовані промислові системи, які використовуються для полегшення автоматизованого введення в експлуатацію. Однак недостатньо роботи над застосуванням готового апаратного забезпечення IoT, яке є недорогим і легкодоступним. Рання робота з дистанційного керування АМВ знаходиться в [57], де локальна мережа (LAN) використовується для полегшення зв'язку з контролерами АМВ у реальному часі в лабораторному середовищі. Використовувана локальна мережа є прямим зв'язком між віддаленим комп'ютером, який використовується для взаємодії системи, та комп'ютерами на АМВ із спеціальним обладнанням для керування в режимі реального часу та зв'язку через Ethernet. Цей метод успішно взаємодіє з АМВ для проведення експериментів на безпечній відстані, але потребує апаратного забезпечення. У [58] віддалений комп'ютер використовується для зв'язку з комп'ютером-сервером через протокол керування передачею/протокол Інтернету (TCP/IP). Сервер передає дані через з'єднання RS-232 із цифровим сигнальним процесором, який, у свою чергу, керує системою АМВ.

Налаштування використовується для віддаленого налаштування посилення контролера АМВ. Jayawant і Davies [59] розробили схему автоматизованого введення в експлуатацію, здатну дистанційно вводити в експлуатацію АМВ через TCP/IP та інтерфейс протоколу простого доступу до об'єктів (SOAP). SOAP надсилає упаковані набори даних між комп'ютерами на високому рівні. Оскільки дані компілюються та упаковуються перед передачею через SOAP, метод може сприяти передачі даних між різними типами систем, наприклад, різними операційними системами. За допомогою SOAP фактичний вектор даних із АМВ передається між локальним і віддаленим комп'ютерами. Обробка даних може відбуватися на одному або обох комп'ютерах. У [60] дистанційне введення в експлуатацію на основі SOAP застосовано до випробувальної установки АМВ із плівкою рідини та промислової турбомашини. Подібні методи дистанційного введення в експлуатацію використовуються в [61] для компресора з двигуном потужністю 3,3 МВт і в [60] для високотемпературного реактора з газоохолодженням.

У цьому дослідженні тестова установка АМВ була доповнена готовим шлюзом IoT, який є недорогим і легко доступним. Локальний пристрій було запрограмовано на зчитування датчиків АМВ і виконання обробки даних для моніторингу стану. Потім віддалений користувач міг увійти в пристрій через віртуальні обчислення мережі (VNC) через TCP/IP, щоб спостерігати за сигналами датчиків. Цей підхід відрізняється від підходу SOAP тим, що вектори даних АМВ не передаються на віддалений комп'ютер. У поточному підході вся обробка даних виконується на локальному шлюзі IoT, а отримані кадри використовуються віддалено для моніторингу стану. Корисність розробленої системи для моніторингу стану АМВ була продемонстрована шляхом роботи випробувального стенду в різних умовах та представлення віддаленого інтерфейсу користувача, що ілюструє, як оцінювався стан системи. Попередні результати цього дослідження представлені в [53].

3.2 АМВ і моніторинг стану в IoT

У цьому підрозділі пояснюється концепція використання IoT для моніторингу стану АМВ. Потім експериментальна система, використана для демонстрації запропонованого методу, деталізується, включаючи інформацію про вартість. Далі представлені результати експерименту. Потім обговорюється практичне питання часу вибірки під час використання пристрою шлюзу IoT.

АМВ використовує магнітне поле для підтримки обертового валу. Магнітне поле створюється масивом електромагнітів навколо ротора. Електромагнітна сила, індукована на феромагнітному роторі, за своєю суттю нестабільна. Положення валу вимірюється в реальному часі безконтактним датчиком положення. Дані про положення використовуються (контролером) для обчислення величини струму, необхідного в електромагнітних котушках для підтримки стабільної левітації. Типове налаштування керування для АМВ показано на рисунку 3.1 [54]. На рисунку 3.1a показано загальну схему зміщення для однієї осі АМВ. На рисунку 3.1b показана блок-схема керування для загальної системи АМВ-ротор, яка є множинним входом-багатьма виходами (МІМО), оскільки ротор може мати декілька АМВ. Таким чином, АМВ за своєю природою включає датчики та виконавчі механізми. Він підходить для моніторингу стану традиційних роторних динамічних несправностей [55]. Його також дуже добре розширити до IoT.

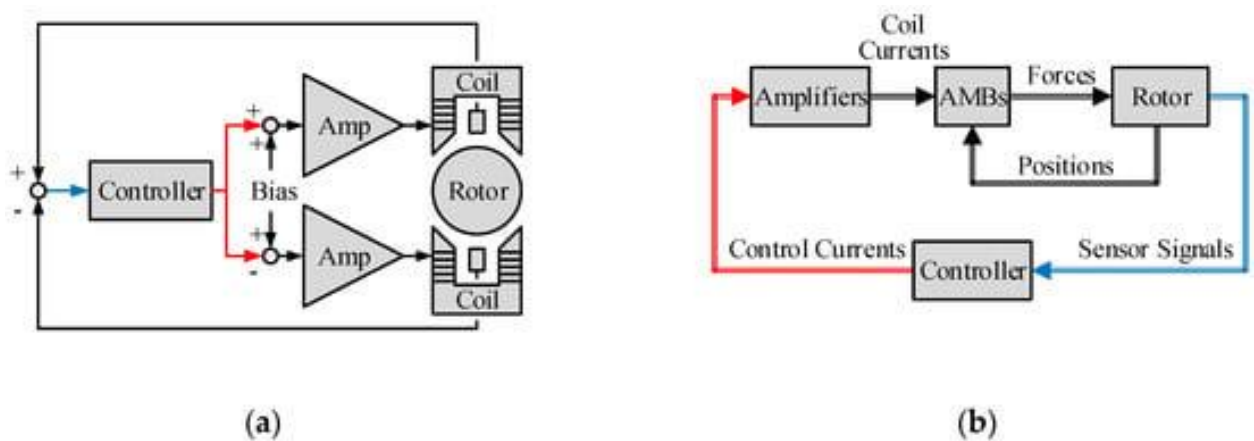


Рисунок 3.1 – Типова схема керування АМВ: (а) зміщення однієї осі керування; та (б) блок-схема управління МІМО

Отримавши доступ до інформації, доступної в АМВ, технік дистанційного обслуговування може контролювати стан системи АМВ. Багато типів інформації можуть бути доступні в контролері АМВ, наприклад швидкість ротора, години роботи, температура, потік тощо, але сигнали, які використовувалися для експериментальної демонстрації в цій роботі, були положенням і струмом. Рисунок 3.2 ілюструє загальну концепцію запропонованого методу моніторингу стану АМВ через IoT. У запропонованій схемі положення ротора та струм котушки, доступні з АМВ, доступні для IoT. Таким чином, фахівець з обслуговування може віддалено увійти до шлюзу та усунути неполадки в системі АМВ. Віддалений технік має можливість діагностувати різні несправності обладнання. Технік може

рекомендувати кінцевим користувачам АМВ коригувальні чи навіть профілактичні дії без необхідності відвідування сервісного центру.

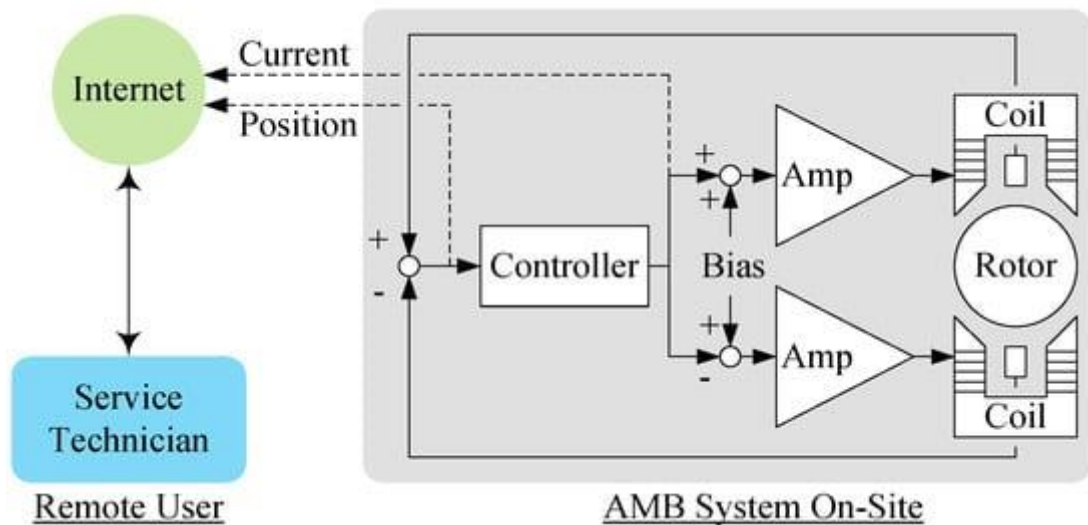


Рисунок 3.2 – Моніторинг стану системи АМВ через концепцію IoT

Наприклад, якщо положення ротора низьке та/або струм котушки високий, це може свідчити про перевантаження валу. Технік може порекомендувати перевірити програму або «запропонувати» більший АМВ. За іншим сценарієм дистанційний технік може спостерігати надто велику орбіту, що вказує на великий дисбаланс. Технік може порекомендувати збалансувати ротор перед продовженням роботи.

3.3 Експериментальна система

Експериментальна система, яка використовується для розробки запропонованого рішення для моніторингу стану IoT, складається з автономної тестової установки АМВ у поєднанні зі шлюзом IoT та іншим обладнанням. Випробувальна установка АМВ — це модель MBC500 від LaunchPoint Technologies, Inc. Вона має сигнали датчиків, які легко доступні через передню панель роз'єму. Вибраний шлюз IoT — одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3 Model B. Експериментальна система показана на рисунку 3.3. На рисунку 3.3 показано загальну систему з: тестовим стендом АМВ, доданими підсилювачами датчиків і блоком АЦП на безпаяній макетній платі та Raspberry Pi з кабелем Ethernet для підключення до Інтернету. Підйомний вал випробувальної установки має металеві хомути, які є рухомими, знімними, виготовленими з різних матеріалів для різної ваги та можуть мати регульований гвинт дисбалансу.

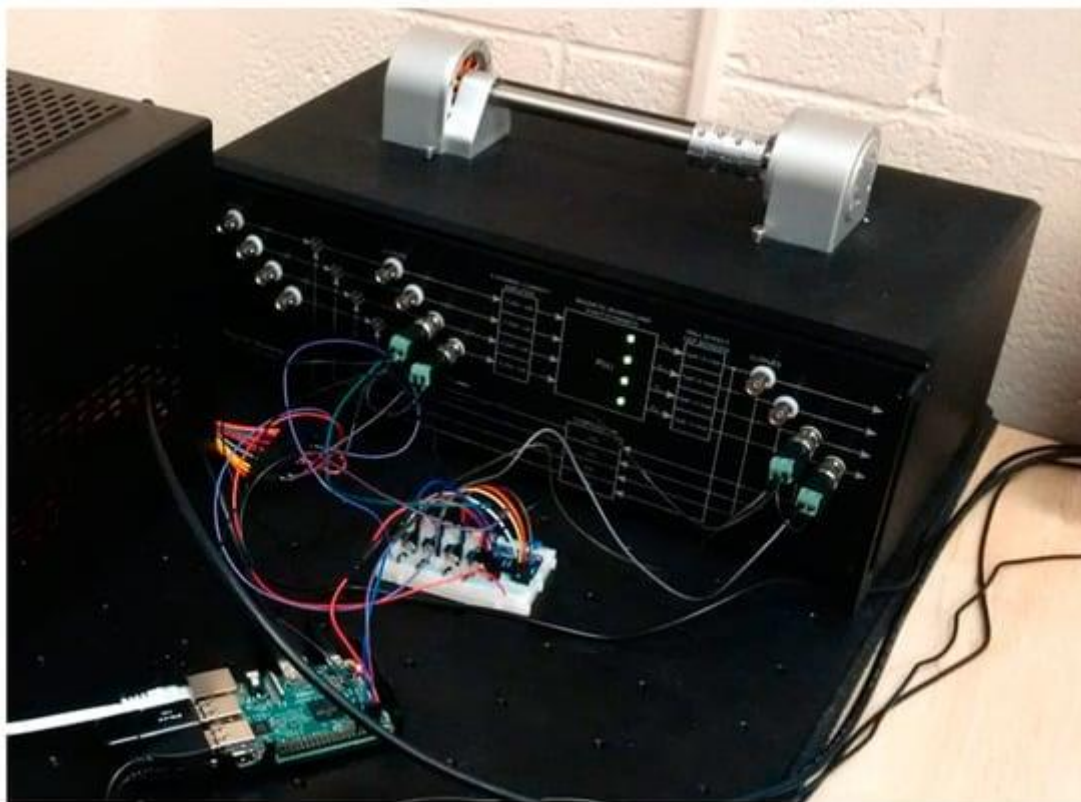


Рисунок 3.3 – Експериментальний випробувальний стенд АМВ із підключеним одноплатним комп'ютером Raspberry Pi, АЦП і схемою кондиціонування

Для взаємодії Raspberry Pi з аналоговими сигналами установки АМВ потрібне додаткове обладнання. Зокрема, плата аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і підсилювачі були використані для налаштування сигналів датчиків у відповідний діапазон. У наступних підрозділах детально описано конфігурацію випробувального стенда АМВ, електронне обладнання для реалізації IoT і відповідне програмне забезпечення.

Розглянемо тестовий стенд АМВ. Випробувальна установка МВС500 АМВ складається з одного валу, що підтримується двома радіальними АМВ на обох кінцях. Положення валу контролювалося датчиками Холла безпосередньо зовні магнітних котушок. Вал виготовлений з нержавіючої сталі, діаметром 12,5 мм. Обертання приводиться в дію повітряною турбіною поблизу внутрішнього АМВ.

До валу були додані рухомі хомути для створення змінної ваги та дисбалансу. Нашийники мають ширину приблизно 10,5 мм і діаметр 28 мм. Для цього випробування використовувалися два хомути (один з алюмінію та один з нержавіючої сталі). Алюмінієвий нашійник 15 г, а нашійник з нержавіючої сталі 36 г. Датчики положення знаходяться на відстані 2,8 мм

від кінців вала. Розташування АМВ і манжет на валу показано на рисунку 3.4.

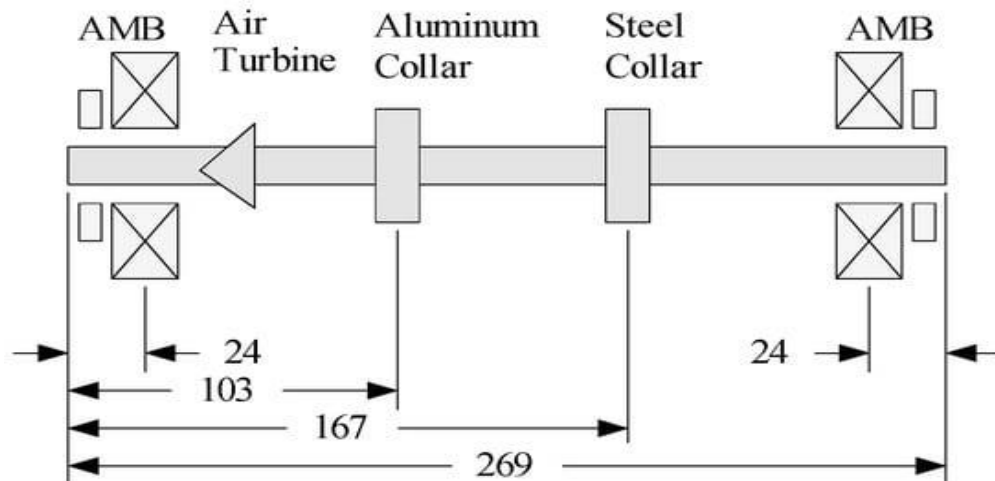


Рисунок 3.4 – Конфігурація ротора. Розміри в мм

АМВ мають вісім полюсів і диференційовано з'єднані по вертикальній і горизонтальній осях. Кожна вісь АМВ має струм зміщення 0,5 А та номінальний зазор 400 мкм. Силова константа АМВ, виходячи з геометрії котушки, становить $2,8 \times 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{А}^2$. Поточна смуга пропускання підсилювача становить приблизно 720 Гц. Контролер АМВ, вбудований у МВС500, є локальним випереджаючим типом. Вбудований контролер використовувався для дослідження стану моніторингу IoT (при переміщенні буртів валів).

Розглянемо апаратне забезпечення додано для IoT. Вибраний шлюз IoT – Raspberry Pi 3 B (~40 доларів США). Raspberry Pi — це одноплатний комп'ютер із чотирьохядерним процесором Broadcom BCM2837 із частотою 1,2 ГГц і 1 ГБ оперативної пам'яті. Він працює під управлінням операційної системи Raspbian, яка заснована на Debian. Для цього дослідження було обрано Raspberry Pi, оскільки це один із найдоступніших шлюзів IoT. Він є економічно ефективним рішенням для віддаленого моніторингу стану. Він широко доступний і тому доступний для доповнення до старих систем АМВ, які вже введені в експлуатацію. Крім того, програмне забезпечення, розроблене для операційної системи Raspbian, можна відносно легко перенести на інші системи на базі Linux. Обмеження цього рішення для шлюзу IoT полягає в тому, що він відносно повільний і не виконує вибірку в реальному часі через операційну систему. Тому він найбільш корисний для моніторингу відносно повільних роторів або систем з низькочастотними режимами підшипників, субгармоніками, зовнішніми збудженнями та режимами підконструкції.

Апаратний інтерфейс Raspberry Pi — це цифрові контакти введення-виведення загального призначення (GPIO). Щоб зчитувати аналогові сигнали з АМВ, необхідно додати АЦП. Для поточного дослідження використовувався 4-канальний 16-розрядний АЦП Texas Instruments ADS1115 (~15 доларів США на платі Adafruit Industries, LLC). Зв'язок між Raspberry Pi і АЦП був реалізований через стандартний цифровий протокол зв'язку I²C. Для цього протоколу потрібні два дроти: один для передачі даних, а другий для синхронізації. На рисунку 3.5, а показана базова схема експериментального впровадження моніторингу стану АМВ через IoT.

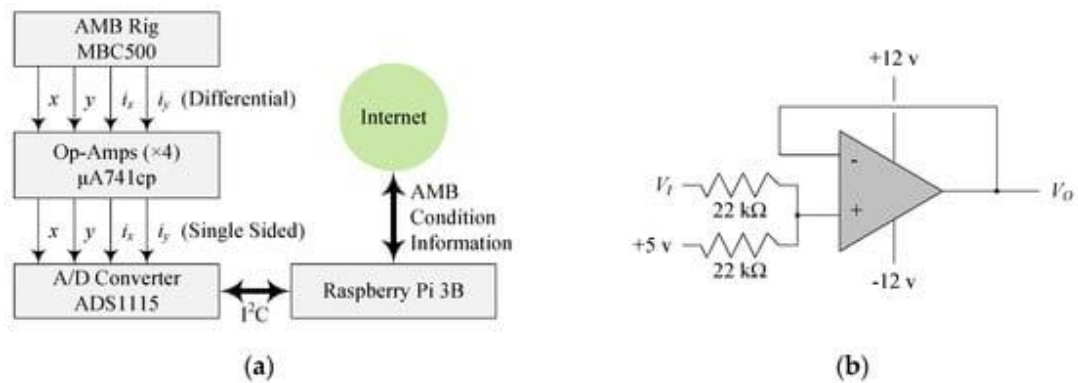


Рисунок 3.5 – Апаратне забезпечення, додане для реалізації IoT: (а) загальна схема; та (б) схема підключення операційного підсилювача

Діапазон вхідного сигналу АЦП є недиференційним, фактично 0–5 В. Діапазон роботи датчиків АМВ знаходиться в межах ± 4 В. Сигнали датчиків були масштабовані та зміщені масивом із чотирьох підсумовувальних підсилювачів. Використовувалися операційні підсилювачі загального призначення Texas Instruments $\mu A741cp$ (кожний < 1 USD). Підсилювачі були підключені, як показано на рисунку 3.4b, щоб досягти діапазону корисної напруги сигналу 0,5–4,5 В. V_I — це вхідний сигнал датчика від АМВ, а V_O — вихідний сигнал, що надсилається на АЦП.

Стандартний блок живлення для ПК (~20 доларів США) забезпечує економічне джерело +12 В і -12 В, а також 5 В, необхідних для підвищення сигналів датчика. Резистори були збалансовані до половини загального сигналу датчика. Точне значення резисторів було підібрано методом проб і помилок для прийнятної відповідності імпедансу.

Для демонстрації розробленої системи моніторингу стану IoT проводився моніторинг одного АМВ повністю левітованої системи. Контрольованими сигналами датчиків були положення валу в горизонтальному та вертикальному напрямках (x та y відповідно) та відповідні струми котушки осі (i_x та i_y відповідно). Програмне забезпечення, завантажене на Raspberry

Pi, використовувало ці дані, щоб дати розуміння умов роботи підвісного АМВ. Весь комплект апаратного забезпечення, доданого для IoT, коштує менше 100 доларів США.

Розглянемо програмне забезпечення для моніторингу стану Інтернету речей. Програмне забезпечення для моніторингу стану IoT було написано для збору вихідних сигналів блоку АЦП і візуального представлення даних на дисплеї. Це включає положення ротора та струм котушки. АЦП відбирає кожен сигнал і перетворює відібрані дані з напруги в біти. Зчитування бітів було передано Raspberry Pi через протокол I²S. Потім біти масштабували для відновлення реальних значень сигналу. Це масштабування передбачало застосування зміщення та чутливості до векторів зібраних даних. Константи зсуву для позицій були отримані (під час здорової левітації) шляхом усереднення векторів позиції. Ці значення було віднято з усіх відповідних значень у кожному відповідному векторі. Чутливість, знайдена шляхом порівняння відомого фізичного шляху зі зміною в бітах, множилася на кожне значення у відповідному векторі. Це дало відкаліброване положення. Подібний процес було виконано для струму, але з додаванням зсуву для точного відображення застосованого струму зміщення.

Далі були побудовані вектори показань позиції та поточних показань для відображення орбіт (x проти y) і положення u з часом і частотою. Частотний графік було створено за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) (через бібліотеку NumPy і команду *numpy.fft*) реконструйованого вектора позиції таким чином: вихідний вибіркового вектора позиції мав непослідовні часові кроки через природу Операційна система Raspbian. Оскільки процесор запускав і операційну систему, і програму моніторингу, цикл виконання коду може бути призупинено для підтримки процесів операційної системи. Для виконання ШПФ, яке вимагає узгодженої частоти дискретизації, вихідний вектор даних і відповідний відомий вектор часу були повторно дискретизовані за допомогою лінійної інтерполяції. Використовуючи оновлений вектор із 512 елементами з початкового приблизно 400 за 5-секундну історію, було вибрано. Цю кількість віртуальних вибірок було вибрано для оптимізації алгоритму ШПФ, але при цьому вона була подібною до фактичної кількості взятих даних (для підтримки точності).

Побудова графіка положення та струму в часовій області та частотній області дало розуміння робочого стану системи АМВ. Програмне забезпечення помістило ці цифри, а також середнє значення кожного з розглянутих параметрів після кожного екземпляра в графічний інтерфейс користувача (GUI). GUI було створено за допомогою бібліотеки matplotlib і команди *matplotlib.pyplot.plot* . Це дозволяло взяти заздалегідь виділене

положення і вектори струму і виразити їх візуально. З Raspberry Pi технік дистанційного моніторингу міг спостерігати за рухами вала в підшипнику та попереджати техніків, які працюють на місці, про можливу несправність.

Для віддаленого підключення до IoT AMB, Secure Shell (SSH), було ввімкнено криптографічний мережевий протокол, щоб дозволити підключення із зовнішнього джерела. Raspberry Pi розміщував сервер за допомогою комерційно доступної програми VNC Server. Технік використовує відповідну програму VNC Viewer (клієнт) (обидві від RealVNC Ltd.) для полегшення підключення за протоколом віддаленого кадрового буфера (RFB). Подібні IoT-рішення з використанням VNC Server були реалізовані в [56, 57, 58]. Загалом, протокол RFB передає пікселі екрана від одного комп'ютера (через мережу) до іншого, а також може надсилати контрольні події (наприклад, миша, клавіатура, сенсорний екран тощо) у відповідь [59]. Для поточного дослідження RFB дозволив віддаленому користувачеві активувати програму IoT, а також спостерігати за роботою підшипника через GUI. Тому не всі вектори даних для положення, струму тощо потрібно передавати. Програма виконала збір даних і відобразила результати для встановленого інтервалу часу 5 с. У майбутніх випусках програма може відображати затримку, постійно оновлювати значення та автоматично перебудовувати цифри.

Було проведено шість випробувань, щоб продемонструвати можливості моніторингу стану розробленої системи AMB IoT. Для кожного випробування манжети вала регулювали для створення різних умов навантаження. Було проведено два випробування з валом у левітації, але без обертання. Було проведено два випробування з обертовим валом. Було проведено два випробування з валом, що обертався з додатковим дисбалансом. Для кожного випадку представлено графічний інтерфейс користувача, який використовує технік дистанційного обслуговування, щоб проілюструвати, як здійснюється моніторинг стану системи AMB.

3.4 Тестування розробленої системи

На рисунках 3.6 і 3.7 показано графічний інтерфейс користувача, який побачить фахівець з віддаленого обслуговування під час виконання програмного забезпечення моніторингу IoT AMB. Програмне забезпечення було виконано шляхом виклику програми перегляду VNC на локальній машині, підключення до певного шлюзу Raspberry Pi IoT і віддаленого виклику програми графічного інтерфейсу моніторингу стану на Raspberry Pi. У верхній частині графічного інтерфейсу є заголовок, який відображає

основну інформацію. (Відображається період часу, протягом якого збираються дані, у цьому випадку 5 с.) Існує порожнє поле розширення для відображення затримки пізнішою версією програмного забезпечення. Також відображаються середні значення положення та струму по вертикальній і горизонтальній осях АМВ.

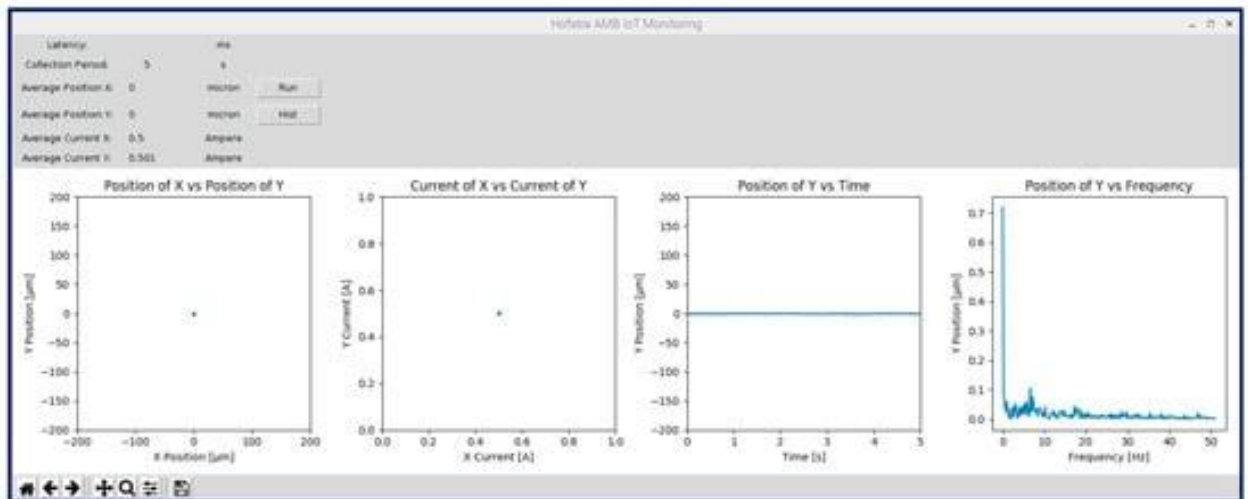


Рисунок 3.6 – Графічний інтерфейс моніторингу стану АМВ IoT для необертового оголеного вала

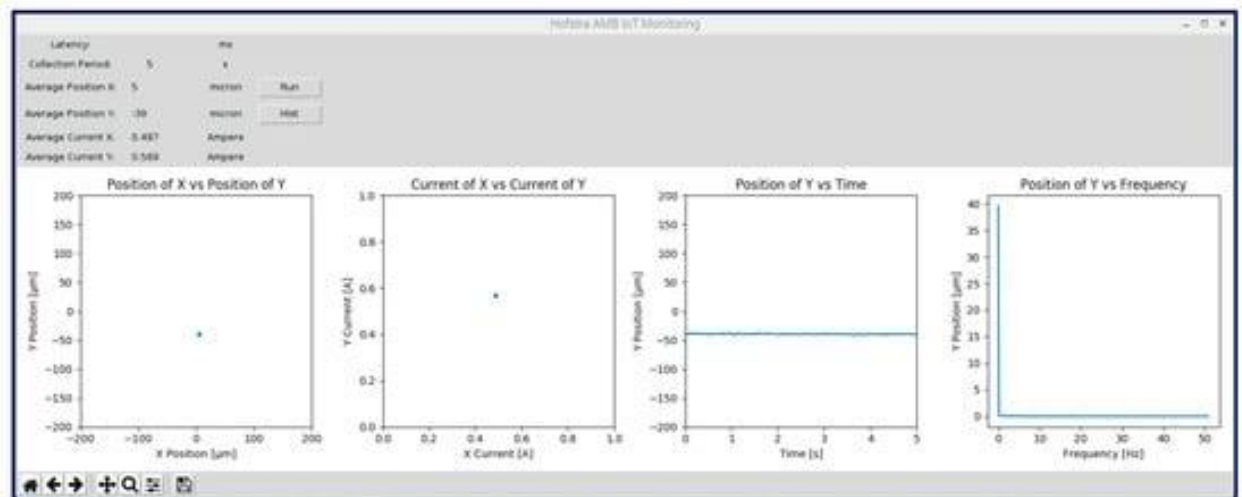


Рисунок 3.7 – Графічний інтерфейс моніторингу стану АМВ IoT для неповоротного вала з двома манжетами

Два ліві графіки є орбітами, які відображають дані від вертикальної проти горизонтальної осей АМВ. Перший графік відображає положення ротора, а другий відображає струм верхньої котушки, розрахований із записаного контрольного струму. Масштаб за замовчуванням для позиційної орбіти становить половину номінального повітряного зазору АМВ ± 200 мкм. Масштаб за замовчуванням служить обмеженням для безпечної роботи,

заздалегідь визначеним досвідченими користувачами. Тому технік може легко визначити, чи знаходиться ротор біля межі безпечної роботи, якщо він наближається до однієї з осей. Масштаб за замовчуванням для поточної орбіти становить 0–1 А. Ротор без левітації знаходитиметься на (0, –400) мкм на позиційній орбіті та (0,0) А на поточній орбіті.

Центральний правий графік відображає часову реакцію вертикального положення ротора протягом усього періоду часу 5 с. На правому графіку відображається відповідний частотний спектр, знайдений за допомогою ШПФ повторно дискретизованих даних позиції.

На рисунку 3.6 показано результати для неповоротного вала без доданих манжет. Вал рівномірно левітував поблизу (0,0) мкм, що є центром АМВ. Струм котушки був близьким до струму зміщення, 0,5 А. Калібрування системи моніторингу стану IoT може відрізнитися від калібрування контролера АМВ.

Частотний спектр, зображений на рисунку, показує лише компонент 0 Гц для статичного зсуву. Зауважте, що контролер АМВ не має вбудованої дії (як у звичайного ПІД-регулятора). На рисунку 3.7 показаний неповоротний вал із двома доданими манжетами. Технік дистанційного обслуговування може зробити висновок про стан статичного навантаження піднятого ротора, відзначивши нижнє підвішене положення та підвищений статичний струм. У випадку, якщо статична деформація була занадто низькою або статичний струм був занадто високим, технік дистанційного обслуговування може діагностувати перевантаження ротора та рекомендувати належні коригувальні дії персоналу на місці без необхідності особистого огляду.

Ротор обертався зі швидкістю 1200 об/хв з манжетами валу та без них. На рисунку 3.8 показано графічний інтерфейс моніторингу стану IoT для футляра без нашійників, а на рисунку 3.9 – для футляра з нашійниками. Технік дистанційного обслуговування може спостерігати за орбітою ротора всередині повітряного зазору АМВ, спричиненого обертанням. В обох випадках орбіта була послідовною та стабільною. Додаткова вага хомутів валу викликала статичне відхилення вниз і відповідне збільшення струму (як у випадку з неповоротними корпусами). Збільшення гравітаційного попереднього навантаження також спричинило незначну анізотропію жорсткості підшипника, що призвело до вертикального подовження орбіти, яке спостерігав технік дистанційного обслуговування.

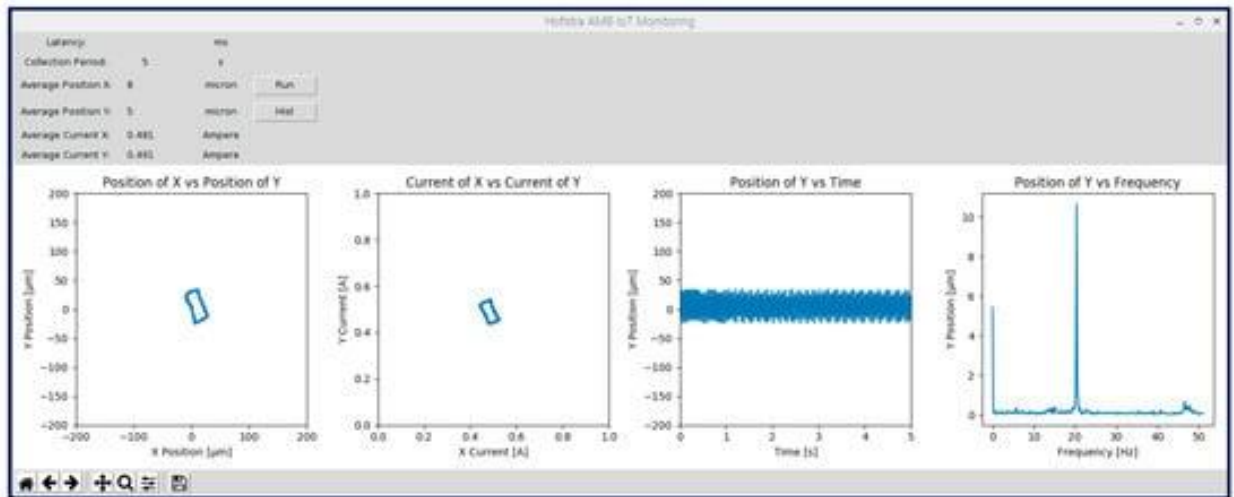


Рисунок 3.8 – Графічний інтерфейс моніторингу стану AMB IoT для обертового оголеного вала

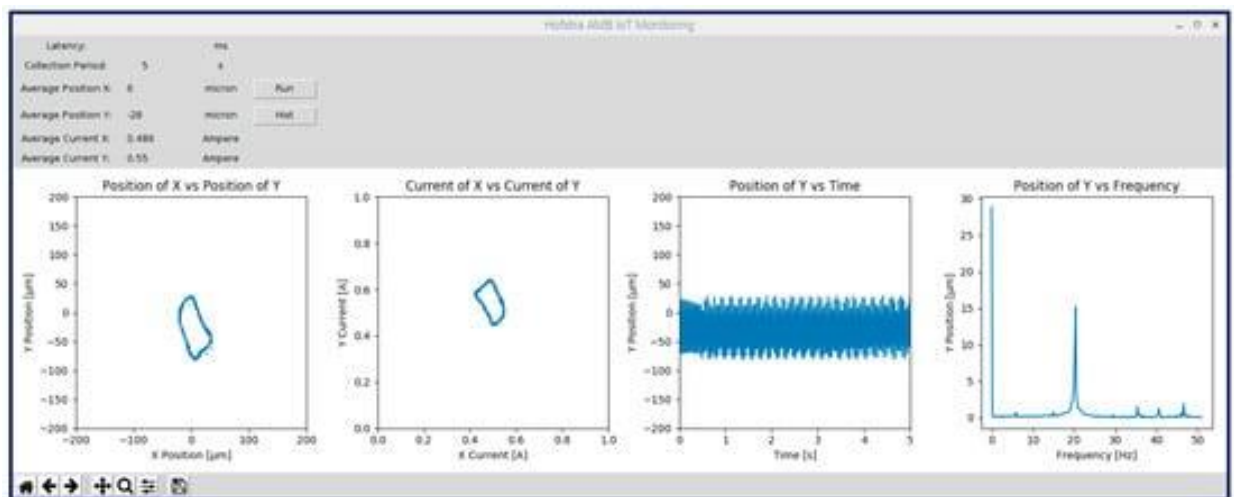


Рисунок 3.9 – Графічний інтерфейс моніторингу стану AMB IoT для обертового вала з двома збалансованими манжетами

Умови обертання ротора можна було додатково спостерігати на часовому графіку, який відображає послідовну гармонічну хвилю. (Частотний спектр мав пік при приблизно 20 Гц, що вказує на швидкість руху.) Випадок із манжетами валу мав дещо вищий пік на швидкості руху через залишковий дисбаланс манжет. Технік дистанційного обслуговування може перевірити частотний спектр для інших компонентів. Наприклад, обертання від центральної лінії підшипника призвело до появи компонента обертання $2\times$ при 40 Гц, як показано на рисунку 3.9.

Тести на незбалансоване обертання

Щоб викликати динамічну несправність ротора, до кожного хомута валу були додані дисбалансні маси (у формі машинного гвинта з відкритою головкою). Отриманий дисбаланс становив приблизно 6,5 г-мм на комір.

Було проведено два тести на дисбаланс. Перший мав обидва гвинти дисбалансу в одному напрямку на роторі для створення статичного дисбалансу. Другий мав гвинти дисбалансу в протилежних напрямках на роторі для створення динамічного дисбалансу. Знову, вал обертався зі швидкістю 1200 об/хв.

На рисунку 3.10 представлено графічний інтерфейс моніторингу стану IoT для тесту статичного дисбалансу, а на рисунку 3.11 — тесту динамічного дисбалансу. Спостерігаючи за графічним інтерфейсом користувача на рисунку 3.10, технік дистанційного обслуговування може діагностувати дисбаланс ротора за дещо підвищеним рівнем вібрації. Це було видно за розміром орбіти, амплітудою вібрації в часі та піком частоти $1\times$. Невелике підвищення рівня вібрації може попередити техніка дистанційного обслуговування про додатковий дисбаланс.

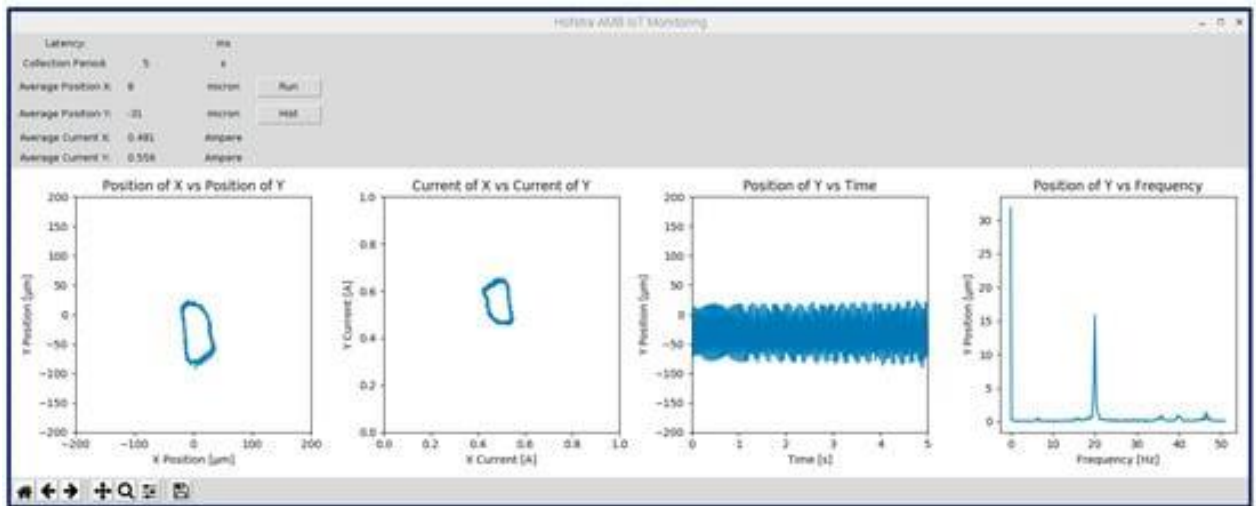


Рисунок 3.10 – Графічний інтерфейс моніторингу стану АМВ IoT для обертового вала з двома манжетами та статичним дисбалансом

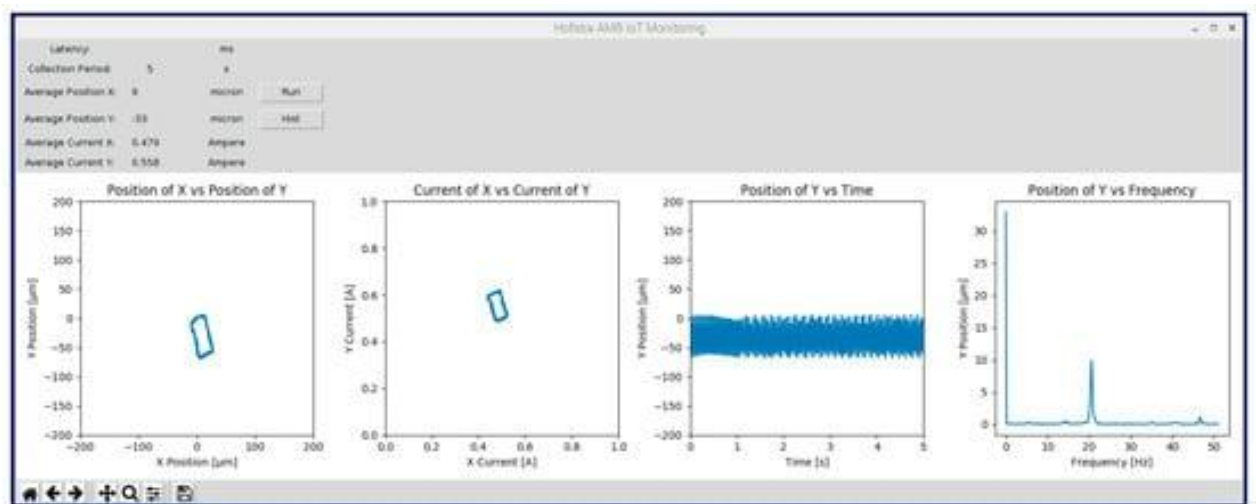


Рисунок 3.11 – Графічний інтерфейс моніторингу стану АМВ IoT для обертового вала з двома манжетами та динамічним дисбалансом

Тест на динамічний дисбаланс показує, що дисбаланс збільшився в алюмінієвому (внутрішньому) хомуті, але додана маса (зовнішнього) хомута з нержавіючої сталі нейтралізувала його власний залишковий дисбаланс. Таким чином, технік дистанційного обслуговування буде спостерігати здоровіший розмір орбіти, хоча й менший, у зазорі підшипників. Можливість віддаленого доступу до цих даних дає змогу техніку віддаленого обслуговування рекомендувати кінцевому користувачеві балансування ротора.

Обмеженням розробленого рішення для моніторингу стану IoT є непослідовна частота дискретизації, яка походить від операційної системи шлюзу IoT. Це відрізняється від, наприклад, спеціального мікроконтролера, який не має операційної системи та пов'язаних фонових дій. Розроблена програма IoT, виконана в Raspbian, досягла типової частоти дискретизації 100 Гц. Однак він страждав від періодичних затримок, які виникають під час виконання операційною системою фонових процесів. Це функції підтримки операційної системи та функціональності периферійних пристроїв та інших програм, запущених віддаленим користувачем. На рисунку 3.12а показана хронологія кроків у часі характерного 5-секундного циклу моніторингу стану.

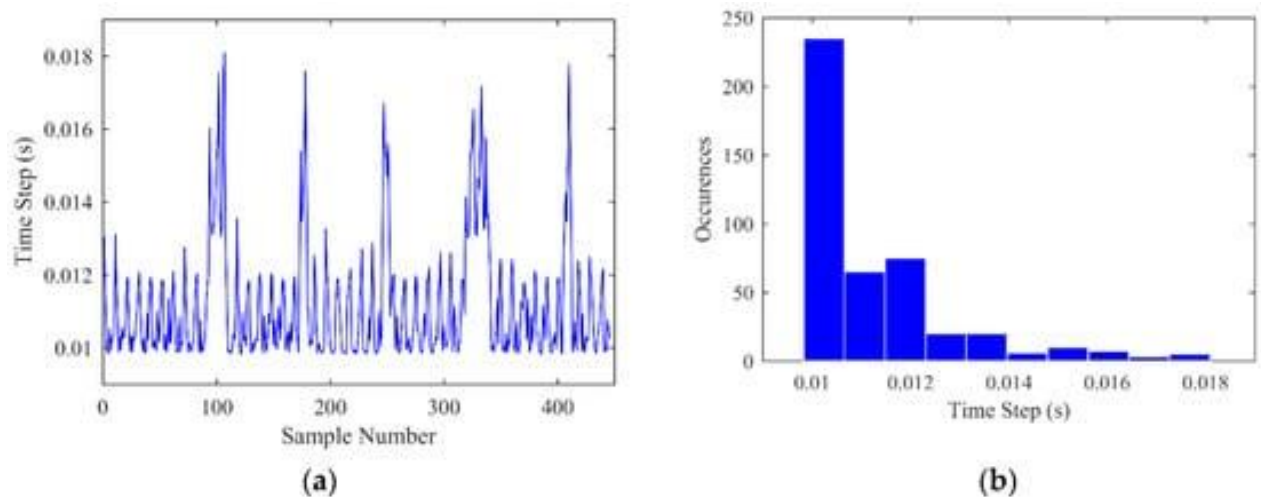


Рисунок 3.12 – Характерний час вибірки для 5 с даних IoT: (а) історія часу; і (б) гістограма

Номінальний час вибірки 0,01 с представлений як базовий рівень на рисунку. Часто час затримувався приблизно на 0,012 с. Крім того, збір даних псевдоперіодично затримувався ще більше на кілька часових кроків, приблизно кожні 1 с. Це призвело до кроку в часі до 0,018 с.

На рисунку 3.12 б показано гістограму часу вибірки для цього циклу 5 с. Гістограма підтвердила, що номінальний час вибірки був домінуючим, але переривався випадковими затримками. Поточне дослідження подолато це обмеження шляхом візуального огляду орбіт (які не сильно залежать від часу) і повторної дискретизації для досягнення практичного частотного спектру. (Однак це питання є важливим для подальшого розвитку IoT для АМВ, тобто виконання активного контролю онлайн.) Можливим рішенням може бути впровадження операційної системи реального часу. Іншим рішенням може бути впровадження програмованого блоку реального часу на одноплатному комп'ютері.

3.5 Висновки до розділу

У даному дослідженні розглядалась проблема дистанційного моніторингу стану АМВ. Було запропоновано рішення використовувати готове апаратне забезпечення IoT і спеціальне програмне забезпечення для прив'язки до позиції АМВ і поточних сигналів. Це дозволило техніку OEM дистанційно спостерігати за сигналами. Запропонована стратегія була продемонстрована на випробувальному стенді АМВ. Шлюз Raspberry Pi та програмне забезпечення VNC Server використовувалися для реалізації підключення IoT. Шлюз IoT та інше пов'язане з ним апаратне забезпечення коштує менше 100 доларів США. Статичне навантаження, статичний і динамічний дисбаланси були накладені на експериментальний ротор. Для кожного випадку стан системи АМВ успішно відстежувався дистанційно.

Тому було зроблено висновок, що готове апаратне забезпечення IoT і спеціальне програмне забезпечення є економічним і ефективним для віддаленого моніторингу стану АМВ. OEM-виробники АМВ можуть застосовувати подібні методи для віддаленого моніторингу своїх продуктів, які працюють на місці для їхніх клієнтів, кінцевих користувачів. Ця можливість зменшить потребу у викликах на місце обслуговування та запобіжить простою АМВ.

Існує кілька перспективних напрямків подальшого розвитку АМВ та IoT. По-перше, слід розглянути кібербезпеку. Іншими словами, необхідно розробити механізми, які гарантуватимуть, що лише призначені користувачі зможуть увійти в систему та отримати доступ до даних АМВ. Крім того, можна розробити мобільний додаток, за допомогою якого користувачі АМВ зможуть перевіряти стан системи з довільних місць. Більш складним є потенційне вдосконалення схеми IoT для використання в режимі реального часу. Двома можливими рішеннями є операційна система реального часу для

шлюзу IoT і використання програмованого блоку реального часу, що збільшить вартість обладнання. Виконання в режимі реального часу призведе до наступного етапу розвитку, кіберфізичної системи, тоді фахівець з обслуговування OEM зможе не тільки контролювати стан системи АМВ і діагностувати проблеми, але й зможе виправляти проблеми, змінюючи закон керування.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи
виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	-	-	-
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	55	57	56
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	-	-	-

Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	-	-	-
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	-	-	-
Середнє значення балів експертів		56,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	-	-	-
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	65	63
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	-	-	-

Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	-	-	-
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	-	-	-
Середнє значення балів експертів	62,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [63]

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 56,0, k_{\text{теор}} = 62,7$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 56,0 + 0,4 \cdot 62,67 = 58,67 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем», даний рівень становить 58,67 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [63]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, (грн.);

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=22$ дні.

$$Z_o = 18350,00 \cdot 11 / 22 = 9175,00 \text{ (грн.)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	18350,00	834,09	11	9175,00
Інженер-дослідник РА 1-ї категорії	15200,00	690,91	22	15200,00
Старший науковий співробітник	15700,00	713,64	7	4995,45
Технік 1-ї категорії	8500,00	386,36	10	3863,64
Всього				33234,09

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ($З_p$) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем» розраховуємо за формулою

$$З_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), приймемо $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [63];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих

об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,10 \cdot 1,25 / (22 \cdot 8) = 62,50 \text{ (грн.)}.$$

$$З_{pl} = 62,50 \cdot 9,30 = 581,25 \text{ (грн.)}.$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
Встановлення обладнання для проведення досліджень	9,30	2	1,10	62,50	581,25
Підготовка робочого місця дослідника РА	5,80	3	1,35	76,70	444,89
Інсталяція програмного забезпечення дослідника РА	4,35	4	1,50	85,23	370,74
Налагодження обладнання	6,45	4	1,50	85,23	549,72
Монтаж дослідних зразків радіовимірювальних сенсорів магнітного поля для IoT систем	7,52	5	1,70	96,59	726,36
Випробування радіоелектронної апаратури (РА)	10,20	3	1,35	76,70	782,39
Контроль ходу експериментів	11,00	2	1,10	62,50	687,50
Всього					4142,84

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доп}} = (33234,09 + 4142,84) \cdot 10 / 100\% = 3737,69 \text{ (грн.)}.$$

4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (4.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (33234,09 + 4142,84 + 3737,69) \cdot 22 / 100\% = 9045,22 \text{ (грн.)}.$$

4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3 \cdot 202,00 \cdot 1,01 - 0 \cdot 0 = 612,06 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.6

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Офісний папір Canon 500/80 A4	202,00	3	0	0	612,06
Папір для записів Canon Papers A5	92,00	3	0	0	278,76
Органайзер офісний BUROMAX	205,00	2	0	0	414,10
Канцелярське приладдя (набір офісного працівника) BUROMAX	215,00	2	0	0	434,30
Картридж для принтера Canon i-sensys LBP6500	1129,00	1	0	0	1140,29
Диск оптичний BUROMAX CD-RW	27,80	4	0	0	112,31
Flesh-пам'ять Kingston Data Traveler 128 GB	295,00	1	0	0	297,95
Тека для паперів BUROMAX	100,00	3	0	0	303,00

Продовження таблиці 4.6 – Витрати на матеріали

Припой ПОС-61	752,00	0,001	0	0	0,76
Лак УР-231	345,00	0,020	0	0	6,97
Склотекстоліт	295,00	0,020	0	0	5,96
Провод монтажний	365,00	0,015	0	0	5,53
Спирт технічний	156,00	0,008	0	0	1,26
Клей	395,00	0,005	0	0	1,99
Термопластик	680,00	0,020	0	0	13,74
Полістирол	345,00	0,040	0	0	13,94
Всього					3642,92

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_6 = 1 \cdot 512,00 \cdot 1,01 = 517,12 \text{ (грн.)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Мікроконтролер Arduino W5100 ethernet shield	1	512,00	517,12
Сенсор магнітного поля – Magnetoresistive - MR) ASR012-10E (NVE)	1	825,00	833,25

Продовження таблиці 4.7 – Витрати на комплектуючі

Транзистори BF928	1	27,00	27,27
BFP450	1	36,50	36,87
BFT93	1	64,50	65,15
Інші комплектуючі	1	100,00	101,00
Всього			1580,65

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 16999,00 \cdot 1 \cdot 1,01 = 17168,99 \text{ (грн.)}.$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Вимірювач магнітного поля лабораторний	1	16999,00	17168,99
Програматор мікроконтролерний	1	8499,00	8583,99
Осцилограф HANTEK DSO2C15 150МГц	1	9599,00	9694,99

Продовження таблиці 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Паяльна станція SEQUIRE MSS12 Pro Intelligent	1	1899,00	1917,99
Всього			37365,96

4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inpr} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

де C_{inpr} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 2459,00 \cdot 1 \cdot 1,01 = 2483,59 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Середовище проектування Electronics Workbench Multisim 12	1	2459,00	2483,59
Пакет Visual System Simulator	1	4529,00	4574,29
Пакет Microwave Office	1	3730,00	3767,30
Пакет MATLAB SIMULINK	1	4300,00	4343,00
Всього			15168,18

4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{Ц_{\bar{o}}}{T_{\bar{o}}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.11)$$

де $Ц_{\bar{o}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{\bar{o}}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (26820,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 1117,50 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.10

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер дослідника (Brain COM 18242-507)	26820,00	2	1	1117,50
Графічно-обчислювальний комплекс на основі EXPERT ВЛТ і5/16/1000	43999,00	3	1	1222,19
Пристрої виводу графічної інформації	7770,00	4	1	161,88

Продовження таблиці 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Оргтехніка	7320,00	5	1	122,00
Приміщення лабораторії розробки радіоелектронної апаратури	410000,00	25	1	1366,67
Робоче місце дослідника	7320,00	4	1	152,50
Пристрої передачі цифрової інформації (Маршрутизатор інтернет WiFi6 TP-Link Archer AX12)	1870,00	4	1	38,96
ОС Windows 10	4260,00	3	1	118,33
Прикладний пакет Microsoft Office 2019 Professional Plus	4800,00	3	1	133,33
Всього				4433,36

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 7,50$ (грн.);

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,05 \cdot 160,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 60,00 \text{ (грн.)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер дослідника (Brain COM 18242-507)	0,05	160,0	60,00
Графічно-обчислювальний комплекс на основі EXPERT VJT i5/16/1000	0,32	160,0	384,00
Пристрої виводу графічної інформації	0,10	5,7	4,28
Оргтехніка	0,32	1,5	3,60
Програматор мікроконтролерний	0,02	20,0	3,00
Робоче місце дослідника	0,08	160,0	96,00
Пристрої передачі цифрової інформації (Маршрутизатор TP-Link Archer AX12)	0,02	160,0	24,00
Вимірювач магнітного поля лабораторний	0,06	100,0	45,00
Осцилограф HANTEK DSO2C15 150МГц	0,04	100,0	30,00
Паяльна станція SEQUIRE MSS12 Pro Intelligent	0,12	25,0	22,50
Всього			672,38

4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Радіовимірвальні сенсори магнітного поля для IoT систем» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

4.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_{\epsilon} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{iv}}{100\%}, \quad (4.13)$$

де H_{iv} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{iv} = 50\%$.

$$I_{\epsilon} = (33234,09 + 4142,84) \cdot 50 / 100\% = 18688,47 \text{ (грн.)}.$$

4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів;

витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 102\%$.

$$B_{нзв} = (33234,09 + 4142,84) \cdot 102 / 100\% = 38124,47 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = З_o + З_p + З_{доо} + З_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (4.15)$$

$$B_{заг} = 33234,09 + 4142,84 + 3737,69 + 9045,22 + 3642,92 + 1580,65 + 37365,96 + 15168,18 + 4433,36 + 672,38 + 0,00 + 0,00 + 18688,47 + 38124,47 = 169836,22 \text{ (грн.)}.$$

Загальні витрати $ЗВ$ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.16)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,95$.

$$ЗВ = 169836,22 / 0,95 = 178774,97 \text{ (грн.)}.$$

4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.17)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 3$;

T_c – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_c = 3$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 3$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 178774,97$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,17$ років, (2 міс.).

Визначення показників I , n , T_c , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [63].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t} = \frac{4^3 \cdot 3 \cdot 3}{178,8 \cdot 0,17} = 19,33.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем» складають 178774,97 (грн.). Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В галузі біомедичної інженерії постійно розробляються нові технології та пристрої, які допомагають людям зберегти здоров'я та життя. Однак важливо дотримуватися вимог безпеки, як під час розробки та проектування, так і під час експлуатації цих пристроїв. При цьому важливо враховувати всі можливі ризики для безпеки. Дотримання вимог охорони праці є важливим для всіх працівників галузі, а також пацієнтів, медичних працівників та виробників медичних пристроїв.

На розробника біотехнічної системи для оцінювання інтенсивності набряку м'яких тканин у хворих на цукровий діабет, згідно Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», мають вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [63]:

- фізичні: підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони; підвищена та знижена температура поверхонь обладнання, матеріалів; підвищена та знижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена та знижена вологість повітря; підвищена та знижена рухливість повітря; підвищена та знижена іонізація повітря; підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини; підвищений рівень статичної електрики; нестача природного світла; недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла; знижена контрастність; пряма та відбита блискіть; підвищена пульсація світлового потоку;

- хімічні: токсичні (озон, вуглекислий газ);

- психофізіологічні: фізичні перевантаження (статичні); нервово-психічні перевантаження (розумові перенапруження; перенапруження аналізаторів; емоційні перевантаження).

Оцінюючи визначені фактори, визначається рішення щодо безпечного виконання роботи під час розробки

5. 1 Технічні рішення з безпечного виконання дослідження

5.1.1 Вимоги безпеки під час роботи з екранними пристроями

Організація робочого місця – це комплекс заходів, спрямованих на створення зручних і безпечних умов праці. Ці заходи включають:

- спеціалізацію робочого місця, тобто визначення його цільового

призначення;

- оснащення робочого місця необхідними засобами і предметами праці, такими як інструменти, обладнання, матеріали;
- розміщення засобів і предметів праці на робочому місці таким чином, щоб забезпечити зручну і ефективну роботу;
- зовнішнє оформлення робочого місця, яке повинно бути комфортним і привабливим;
- створення належних умов праці, таких як освітлення, вентиляція, опалення.

Конкретний зміст цих заходів визначається характером і спеціалізацією робочого місця, його видом і значенням у виробничому процесі.

Організація робочого місця користувача ПК має відповідати ергономічним вимогам ДСТУ 8604:2015, НПАОП 0.00-7.15-18, характеру та особливостям трудової діяльності. Площа одного робочого місця користувача ПК повинна складати не менше 6 м², а об'єм – не менше 20 м³. Прохід між рядами робочих місць має бути не меншим 1 м. Висота робочої поверхні столу для ПК має бути в межах 680–800 мм, а ширина – забезпечувати можливість виконання операцій в зоні досяжності моторного поля. Рекомендовані розміри столу: висота – 725 мм, ширина – 600–1400 мм, глибина – 800–1000 мм [64].

Екран комп'ютера та клавіатура повинні розташовуватися на відстані від очей користувача, яка забезпечує комфортну роботу. Відстань від очей до екрана повинна бути не менше 600 мм. Це гарантує, що користувач не буде напружувати очі, дивлячись на екран. Розмір алфавітно-цифрових знаків та символів на екрані також має враховуватися при виборі оптимальної відстані. Якщо знаки та символи занадто дрібні, користувачеві доведеться напружувати очі, щоб їх розібрати.

Робоче місце розробника біотехнічної системи для оцінювання інтенсивності набряку м'яких тканин у хворих на цукровий діабет складається зі столу, крісла і підніжки, які дають змогу зберігати раціональну робочу позу впродовж усього робочого дня. Робочий стіл, який відповідає сучасним вимогам ергономіки, має правильні розміри та функції, щоб забезпечити комфортну та ефективну роботу. Він достатньо великий, щоб вмістити всі необхідні предмети, і має такі функції, як регульована висота, кут нахилу та обертовий екран. Робочий стілець, який можна підняти або опустити, а також нахилити спинку. Сидіння плоске, а передній край закруглений. Регулювання за висотою та кутом нахилу здійснюється незалежно, легко і надійно фіксується.

Конструкція робочого місця користувача ПК має забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози з такими ергономічними характеристиками:

- ступні ніг – на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна – в горизонтальній площині;
- передпліччя – вертикально;
- лікті – під кутом 70 – 90 град. до вертикальної площини;
- зап'ястя зігнуті під кутом не більше 20 град. відносно горизонтальної площини,
- нахил голови – 15 – 20 град. відносно вертикальної площини.

Щодня в приміщеннях, де працюють з комп'ютерами, потрібно проводити вологе прибирання, щоб видалити пил і бруд. Також у цих приміщеннях повинні бути медичні аптечки першої допомоги, щоб допомогти працівникам у разі травм або нещасних випадків.

5.1.2 Електробезпека

Живлення обладнання та системи освітлення здійснюється від чотирьох провідної трифазної мережі з глухозаземленою нейтраллю 380 х 220В (фазна напруга фаза (фаза – «0») – 220В, а між фазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

У приміщенні, де здійснюється розробка біотехнічної системи для оцінювання інтенсивності набряку м'яких тканин у хворих на цукровий діабет використовується трифазна чотирипровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Відповідно з НПАОП 40.1-1.32-01 умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами без підвищеної небезпеки, тому що в приміщенні відсутні фактори підвищеної небезпеки ураження електричним струмом.

Приміщення, де працюють з комп'ютерами, повинні бути обладнані технічними засобами захисту, щоб забезпечити електробезпеку як обладнання, так і працівників. Ці засоби захисту повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.5-82:2016 [65].

Для живлення приладів, периферійних пристроїв ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК використовується окрема трипровідна мережа, яка складається з фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник з'єднує корпуси електроприймачів із заземлювачем, щоб захистити людей від ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції.

ПК, периферійні пристрої ПК та устаткування для обслуговування,

ремонту та налагодження ПК, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники тощо), електропроводи та кабелі за виконанням та ступенем захисту мають відповідати класу зони за ПУЕ, мати апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів.

Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на негорючу ізоляцію.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Відповідно до Державних санітарних норм «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» (ДСН 3.3.6.042-99) [66], мікроклімат виробничих приміщень – це умови внутрішнього середовища цих приміщень, які впливають на тепловий обмін працівників з навколишнім середовищем шляхом конвекції, кондукції, теплового випромінювання та випаровування. вологості. Вони включають в себе поєднання таких факторів, як температура, відносна вологість, швидкість руху повітря, температура поверхні, що оточують роботу, інтенсивність теплового (інфрачервоного) проміння.

Мікроклімат виробничих приміщень нормується в залежності від теплових характеристик виробничого приміщення, категорії робіт по важкості і періоду року. Робота розробника біотехнічної системи для оцінювання інтенсивності набряку м'яких тканин у хворих на цукровий діабет відноситься до категорії Іа. Допустимі параметри мікроклімату для категорії Іа наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1 – 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 допустимих показників мікроклімату, відповідних нормам, передбачена централізована система опалення та вентиляції з режимом припливу та витяжки повітря. Крім цього, регулярно, один раз на

зміну, вологе прибирання, і при необхідності – забезпечується провітрювання через вікна та двері. Для додаткового регулювання температури встановлено кондиціонер.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється розробка біотехнічної системи для оцінювання інтенсивності набряку м'яких тканин у хворих на цукровий діабет, можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил, вуглекислий газ та озон. Озон утворюється в результаті роботи офісної техніки, такої як принтери, пил потрапляє в приміщення ззовні. Важливо врахувати ці джерела забруднення повітря при плануванні та організації внутрішнього середовища в приміщенні. Допустимі граничні концентрації шкідливих речовин у досліджуваному місці, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

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

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи кондиціювання та вологого прибирання. За наявності великих концентрацій озону або інших шкідливих речовин можуть бути передбачені додаткові заходи для забезпечення здорового та безпечного робочого середовища.

5.2.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [67] система природного освітлення в досліджуваному приміщенні відноситься до бокової. Характеристика зорових робіт – високої точності.

Однією з категорій є природне освітлення, яке забезпечується світлом неба, яке проникає в приміщення через світлові пройми в зовнішніх огорожувальних конструкціях. З точки зору спектрального складу, природне освітлення є найбільш природним і сприятливим для ока. При вивченні такого освітлення враховується коефіцієнт природної освітності

(КПО), який визначає відношення природного світу, що пропускає в певну точку внутрішньої площі приміщення від небесного світу значення до зовнішньої горизонтальної освітленості. Для тих областей, які освітлюються виключно бічним світлом, встановлюються обов'язкові мінімальні значення КПО у межах робочої зони.

Штучне освітлення використовують у двох основних системах: загальному та комбінованому. Загальне – передбачає розміщення світильників у верхній зоні приміщення з наданням можливості забезпечення рівномірного освітлення. Комбіноване – включає в себе додаткове місцеве освітлення, де до загального освітлення додається окрема система світильників, які спрямовані на робочі місця з метою покращення видимості та комфорту працівників.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [67], розробка біотехнічної системи для оцінювання інтенсивності набряку м'яких тканин у хворих на цукровий діабет, потребують освітлення, яке характеризується розрядом зорової роботи III, підрозряд «в». Нормовані значення штучного, природного та суміщеного освітлення наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменш ий або еквівалент-ний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Високої точності	Від 0,3 до 0,5 включно	III	в	малий середній великий	Світлий Середній Темний	600	200	-	3,0

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп [E27 LED 15W NW A60 "SG"](#). Висота підвісу світильників

над робочою поверхнею 2,5 метра.

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

5.2.4 Виробничий шум

Звук або шум виникає в результаті механічних коливань у твердих, рідких і газоподібних середовищах. Звуки, які передаються через будівельні конструкції, відомі як структурний шум, в той час як ті, що поширилися в повітряному середовищі, називають повітряним шумом. Будь-яке небажане акустичне явище позначається як шум. Шум може мати шкідливий вплив на здоров'я, знизити працездатність та підвищити рівень небезпеки. Тому важливо передбачити заходи для захисту від шуму.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [68]. Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях, обладнаних ПК, мають відповідати вимогам наведеним в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності, робочі місця	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньо геометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Оператори з обробки інформації	96	83	74	68	63	60	57	55	54

Одним з найпростіших та економічно доцільних способів зниження шуму є застосування методів звукоізоляції та звукопоглинання, тому раціональним рішенням буде установка пластикових вікон, для зменшення звукового навантаження на працівників.

5.2.5 Електромагнітні випромінювання

Вплив електромагнітних полів (ЕМП) на організм людини залежить від декількох факторів, включаючи частоту, інтенсивність та тривалість впливу, характер випромінювання (чи неперервне, чи модульоване), розмір його

області тіла, що піддається впливу та індивідуальних особливостей організму.

ЕМП може викликати як біологічні, так і функціональні порушення в організмі людини. Функціональні ефекти можуть включати передчасну втомлюваність, частину головного болю, порушення сну, вплив на центральну нервову систему та порушення серцево-судинної системи. При систематичному впливі ЕМП спостерігаються такі прояви, як перепади кров'яного тиску, сповільнення пульсу, розлади нервово-психічного характеру та деякі атрофічні прояви. Сучасні дослідження свідчать, що радіочастотне випромінювання може впливати на центральну нервову систему і мати значний вплив на здоров'я.

Умови праці при дії неіонізуючих електромагнітних полів та випромінювань відповідають 3 класу шкідливості при перевищенні на робочих місцях ГДР, що встановлені для відповідного часу дії, з урахуванням значень енергетичних експозицій в тих діапазонах частот, де вони нормуються. При одночасній дії на працівників неіонізуючих електромагнітних полів та випромінювань, що створюються декількома джерелами, які працюють у різних нормованих частотних діапазонах, клас умов праці на робочому місці встановлюється за фактором, що отримав найбільший ступінь шкідливості. При цьому, якщо виявлено перевищення ГДР у двох і більше нормованих частотних діапазонах, ступінь шкідливості збільшується на одну одиницю.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань на робочому місці проектувальника наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі значення параметрів неіонізуючого електромагнітного випромінювання

Найменування параметра	Допустимі
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В/м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	20кВ/м
для дорослих користувачів	
для дітей дошкільних установ і що вчатьс	15кВ/м
середніх спеціальних і вищих учбових закладів	

Для зменшення впливу електромагнітного випромінювання на

розробника слід дотримуватися раціонального режиму роботи та відпочинку.

5.2.6 Психофізіологічні фактори

Оцінка психофізіологічних факторів під час роботи здійснюється відповідно до Гігієнічної класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Загальні енергозатрати організму: до 174 Вт.

Стереотипні робочі рухи (кількість за зміну): до 40 000.

Робоча поза: вільна зручна поза, можливість зміни пози («сидячи – стоячи») за бажанням працівника; перебування в позі «стоячи» до 40% часу зміни.

Нахили тулуба (вимушені, більше 30°), кількість за зміну: до 50 раз.

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

– зміст роботи – творча діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму;

– сприймання інформації та їх оцінка – сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальними значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів;

– розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, виконання завдання та його перевірка.

Сенсорні навантаження:

– зосередження (% за зміну) – до 5-75%;

– щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150;

– навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80 %;

– спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) – 4-6 год.

– навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 16 до 20.

Емоційне навантаження:

ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний;

Режим праці:

– тривалість робочого дня – 8 год;

– змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

За зазначеними показниками важкості та напруженості праці, робота, яка виконується належить до допустимого класу умов праці (напруженість

праці середнього ступеня).

5.3 Розрахунок надлишкового тиску вибуху для пилоповітряної суміші

Дослідницька лабораторія, де розробляється біотехнічна система для оцінювання інтенсивності набряку м'яких тканин у хворих на цукровий діабет, знаходиться в будинку, обладнаному індивідуальною системою опалення. Ця система працює на альтернативному паливі, зокрема на паливних брикетах (пелетах), що сприяє екологічній та енергоефективній роботі лабораторій. Такий підхід зменшує вплив на довкілля та забезпечує надійне та стабільне опалення будівлі, що є місцем діяльності для дослідницького центру [69].

Розрахунок надлишкового тиску вибуху для пилоповітряної суміші виконується для котельного приміщення обладнаного двома котлами BRS 600 COMFORT BM на основі таких вихідних даних:

- речовина – деревний горючий пил від пелет;
- розміри приміщення $l=8$ м, $d=4$ м, $h=4$ м;
- розрахункова температура $t_p=24$ °C;
- об'єм апаратів – $V=0,56$ м³ ;
- витрата твердого палива – $q=0,000046$ м³·с⁻¹.

Густина повітря при розрахунковій температурі t_n , кг·м³, визначається:

$$\rho_n = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367t_p)} = \frac{29}{22,413(1 + 0,0036 \cdot 24)} = 1,19 \text{ (кг/м}^3\text{)}$$

де: $M=29$ – середня молярна маса повітря при 0°, кг·кмоль⁻¹;

V_0 – мольний об'єм, що дорівнює 22,413 м³·кмоль⁻¹;

t_p – розрахункова температура,

°C (максимально можлива температура повітря в даному приміщенні).

З врахуванням того, що в стан пилу може переходити до 2% палива, маса пилу, що осідає на важкодоступних для прибирання поверхнях у приміщенні за період часу між генеральними прибираннями

$$m_1 = 0,25 \cdot 0,000046 \cdot 7 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 0,02 = 0,14 \text{ кг.}$$

Маса пилу, що осідає на доступних для прибирання поверхнях у приміщенні за період часу між поточними прибираннями

$$m_2 = 0,75 \cdot 0,000046 \cdot 7 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 0,02 = 0,42 \text{ кг.}$$

Масу пилу, що відклався у приміщенні до моменту аварії, визначають за формулою

$$m_n = K_{\text{г}} \cdot (1 - K_{\text{пр}}) \cdot (m_1 + m_2), (\text{кг})$$

$$m_n = 0,09 \cdot (1 - 0) \cdot (0,14 + 0,42) = 0,05, (\text{кг})$$

де $K_{\text{г}} = 0,09$ - частка горючого пилу в загальній масі відкладень пилу;

$K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт ефективності прибирання пилу, який приймається у разі прибирання пилу вручну: у разі сухого прибирання – 0,6, розрахунок проведемо за умови максимального забруднення приміщення – $K_{\text{пр}} = 0$ [70].

Розрахункову масу пилу, що перейшов у стан аерозолі, $m_{\text{зг}}$ визначають за формулою

$$m_{\text{зг}} = K_{\text{зг}} \cdot m_n,$$

$$m_{\text{зг}} = 0,9 \cdot 0,05 = 0,045 (\text{кг})$$

де $K_{\text{зг}}$ – частка пилу, що відклався у приміщенні, яка здатна перейти у стан аерозолі результаті аварійної ситуації. У разі відсутності експериментальних даних щодо значення $K_{\text{зг}}$, допускається приймати $K_{\text{зг}} = 0,9$.

Маса горючого пилу, що викидається до приміщення з апарата в момент аварії

$$m_{\text{ап}} = V \cdot n \cdot \rho_{\text{в}} = 0,56 \cdot 0,02 \cdot 750 = 8,4 (\text{кг}),$$

де $n = 0,02$ – частина палива в котлі, що знаходиться в пилоподібному стані;

$\rho_{\text{в}} = 750 \text{ кг/м}^3$ – густина деревного палива, кг/м^3 .

Розрахункову масу пилу, що потрапила до приміщення з апарата або технологічного обладнання в результаті аварійної ситуації, $m_{\text{ав}}$, визначають за формулою

$$m_{\text{ав}} = (m_{\text{ап}} + q \cdot \tau) \cdot K_{\text{п}},$$

$$m_{\text{ав}} = (8,4 + 0,000046 \cdot 30) \cdot 1 = 8,405 (\text{кг})$$

де $q = 0,0023$ – витрати, з якими продовжують надходити пилоподібні

речовини до аварійного апарата по трубопроводах до моменту їх перекривання, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

$\tau = 30$ – час перекривання, який визначається за паспортними даними обладнання, с;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт пилення, що представляє собою відношення маси пилу у стані аерозолі до усієї маси пилу, який надійшов з апарата до приміщення. У разі відсутності експериментальних даних щодо значення $K_{\text{п}}$, допускається приймати: для пилу з дисперсністю менше ніж 350 мкм $K_{\text{п}} = 1,0$.

Розрахункову масу пилу, що знаходиться у стані аерозолі в об'ємі приміщення в результаті аварійної ситуації, m , кг, визначають за формулою

$$m = m_{\text{зв}} + m_{\text{ав}},$$

Тому розрахункова маса пилу, що потрапила до приміщення з апарата або технологічного обладнання в результаті аварійної ситуації складатиме

$$m = 0,045 + 8,405 = 8,45 \text{ (кг)}$$

Інтенсивність теплового випромінювання розраховуємо для пожежі «вогненна куля».

Ефективний діаметр «вогняної кулі» D_s , м, визначаємо за формулою

$$D_s = 5,33m^{0,327} = 5,33 \cdot 8,45^{0,327} = 10,71 \text{ (м)}.$$

Висоту центра «вогняної кулі» визначаємо

$$H = D_s/2 = 10,71/2 = 5,35 \text{ (м)}.$$

Час існування «вогняної кулі» t_s , с, визначаємо за формулою

$$t_s = 0,92m^{0,303} = 0,92 \cdot 8,45^{0,303} = 1,76 \text{ (с)}.$$

Відстань від зовнішніх меж кулі до точки на поверхні землі безпосередньо під центром «вогняної кулі»

$$r = \sqrt{D_s^2 + H^2} = \sqrt{10,71^2 + 5,35^2} = 12 \text{ (м)}$$

Коефіцієнт пропускання теплового випромінювання крізь атмосферу ψ

розраховуємо за формулою

$$\begin{aligned}\psi &= \exp \left[-7 \cdot 10^{-4} (\sqrt{r^2 + H^2} - D_s/2) \right] \\ &= \exp \left[-7 \cdot 10^{-4} (\sqrt{12^2 + 5,35^2} - 10,71/2) \right] = 0,97\end{aligned}$$

Кутовий коефіцієнт опромінення

$$\begin{aligned}F_q &= \frac{H/D_s + 0,5}{4 \cdot \left[\left(H/D_s + 0,5 \right)^2 + (r/D_s)^2 \right]^{1,5}} \\ &= \frac{5,35/10,71 + 0,5}{4 \cdot \left[\left(5,35/10,71 + 0,5 \right)^2 + (12/10,71)^2 \right]^{1,5}} = 0,0738\end{aligned}$$

Інтенсивність теплового випромінювання обчислюємо за формулою

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \psi = 450 \cdot 0,0738 \cdot 0,97 = 32,2 \text{ (кВт} \cdot \text{м}^{-2}\text{)},$$

де E_f – середньоповерхнева густина теплового потоку випромінювання полум'я, кВт·м⁻², величину E_f приймаємо рівною 450 кВт·м⁻² [73].

Надлишковий тиск вибуху ΔP , кПа, для індивідуальних горючих речовин, які складаються з атомів горючого пилу визначається за формулою

$$\begin{aligned}\Delta P &= \frac{m \cdot H_T \cdot P_o \cdot Z}{V_{вільн} \cdot \rho_{п} \cdot C_p \cdot T_o} \cdot \frac{1}{K_n}, \\ \Delta P &= \frac{8,45 \cdot 15500 \cdot 101 \cdot 0,5}{136 \cdot 1,19 \cdot 1,01 \cdot 10^3 \cdot 298} \cdot \frac{1}{3} = 0,05 \text{ (кПа)}\end{aligned}$$

де m – маса пилу, що потрапив в результаті розрахункової аварії до приміщення,

$H_T = 15500$ - теплота згоряння, кДж·кг⁻¹;

P_o - початковий тиск, кПа (допускається приймати таким, що дорівнює 101 кПа);

Z – коефіцієнт участі ГГ або парів у вибуху, який може бути розрахований на підставі характеру розподілення газів і парів в об'ємі приміщення згідно з додатком;

$V_{вільн}$ – вільний об'єм приміщення, м³;

$\rho_{п}$ – густина повітря до вибуху при початковій температурі T_o , кг·м⁻³;

C_p – теплоємність повітря, Дж·кг⁻¹·К⁻¹ (допускається приймати рівною 1,01·10³ Дж·кг⁻¹·К⁻¹);

T_o – початкова температура повітря,

K_H – коефіцієнт, що враховує негерметичність приміщення й неадіабатичність процесу горіння (приймається $K_H = 3$)

Таким чином, за розрахунками параметрів вибуху пило-повітряної суміші в разі виникнення умовної аварії можна зробити такі висновки:

– очікувана величина надлишкового тиску ударної хвилі становить: $\Delta P_{ф.макс} = 0,05$ кПа;

– внаслідок дії ударної хвилі можливі слабкі склінь, руйнування деяких видів обладнання;

– для підвищення стійкості приміщення та обладнання до дії ударної хвилі необхідно підсилити основні конструкції та збільшити площу конструкцій, що легко руйнуються;

– за розрахованих інтенсивності та тривалості теплового випромінювання можна зробити висновок, що займання речовин та матеріалів в приміщенні не відбудеться, можливе лиш незначне їх обуглення.

ВИСНОВКИ

У першому розділі описано декілька високоефективних композитних пристроїв ММЕ, що складаються з п'єзоелектричних, магнітострикційних, трибоелектричних і постійних магнітних матеріалів, які були розроблені для

збирачів енергії та датчиків магнітного поля для IoT та біомедичних застосувань. Композитні матеріали ММЕ можуть забезпечувати перетворення розсіяних магнітних полів в електричний сигнал і, таким чином, можуть використовуватися як високоефективні генератори енергії або надчутливі магнітні датчики. Зокрема, композити ММЕ з модифікацією п'єзоелектричних кристалів і магнітострикційних матеріалів шляхом адаптації кристалографічної орієнтації або покращення властивостей втрат дають помітне збільшення вихідної потужності для генераторів ММЕ. Крім того, застосування структури концентрації магнітного потоку та поверхнево-модифікованих трибоелектричних матеріалів або гібридизація кількох принципів перетворення енергії в генераторах ММЕ забезпечує безперервну роботу датчиків IoT, а також оптогенетичну нейромодуляцію без зовнішніх джерел енергії.

В другому розділі представлено дослідження та реалізацію ізотропного лічильника індукції магнітного поля на основі надзвичайно низької частоти (ELF) IoT. Розроблена математична модель ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку. Отримано функцію перетворення сенсора магнітного поля. На основі математичної моделі розроблено прототип схеми сенсора магнітного поля, який може вимірювати щільність магнітного потоку від 100 нТл до 10 мкТл за допомогою 3 квадратних ідентичних сенсорних зондів у вертикальному вирівнюванні, забезпечуючи вимірювання ізотропного поля в площинах X, Y та Z. Лічильник має плоску характеристику в робочому діапазоні частот від 40 Гц до 10 кГц. Запропонований недорогий прилад може вимірювати всі магнітні поля від таких джерел, як трансформатори, електродвигуни, обігрівачі, фени та мережу живлення, а також їх гармонічні частоти. Плата Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 з інтегрованим модулем WiFiNINA відповідає за передачу даних від датчика до хмари, як повне рішення IoT. Виміряне магнітне поле можна відобразити на будь-якому мобільному пристрої з підключенням Wi-Fi, що підтримується програмою Blynk через операційні системи Android та iOS або веб-інтерфейс. Як майбутній аспект, покращена версія запропонованого ізотропного вимірювача може бути використана для реалізації розподіленої мережі датчиків EMF IoT для віддаленого моніторингу впливу магнітного поля ELF у цікавій зоні високого ризику. Крім того, функція Arduino FFT також може відобразити виміряну напруженість магнітного поля в межах його гармонійних частот у майбутній покращеній реалізації. Наявність магнітних полів у міських і напівміських районах може бути використана як аварійне резервне джерело енергії для живлення електронних пристроїв з низьким споживанням, таких як датчики Інтернету речей (IoT). У нашому

дослідженні також було представлено реалізацію схеми збору енергії ELF (ЕН) для використання змінного магнітного поля (50 Гц), отриманого від роботи трансформаторів, джерел живлення та інших споживчих пристроїв як у лабораторії, так і в ближньому відстань підстанцій середньої напруги електричної мережі загального користування. Експериментальні вимірювання показали, що напруга збирання (постійного струму) може досягати до 4,2 вольт з магнітним полем 33 мкТ, яке спричинено роботою електричного фена, і може повністю зарядити накопичувальний конденсатор (C_s) 100 мкФ запропоновану систему ЕН приблизно за 3 хв. Використання більш високого значення індуктивності котушки (з одночасним зміною ємності конденсатора) створює більш чутливу схему для ефективної енергії, отриманої від магнітних полів пристроїв, що працюють на частоті мережі (50 Гц).

У третьому розділі представлені дослідження дистанційного моніторингу стану АМВ. Було запропоновано рішення використовувати готове апаратне забезпечення IoT і спеціальне програмне забезпечення для прив'язки до позиції АМВ і поточних сигналів. Це дозволило техніку OEM дистанційно спостерігати за сигналами. Запропонована стратегія була продемонстрована на випробувальному стенді АМВ. Шлюз Raspberry Pi та програмне забезпечення VNC Server використовувалися для реалізації підключення IoT.

Існує кілька перспективних напрямків подальшого розвитку АМВ та IoT. По-перше, слід розглянути кібербезпеку. Іншими словами, необхідно розробити механізми, які гарантуватимуть, що лише призначені користувачі зможуть увійти в систему та отримати доступ до даних АМВ. Крім того, можна розробити мобільний додаток, за допомогою якого користувачі АМВ зможуть перевіряти стан системи з довільних місць. Більш складним є потенційне вдосконалення схеми IoT для використання в режимі реального часу. Двома можливими рішеннями є операційна система реального часу для шлюзу IoT і використання програмованого блоку реального часу, що збільшить вартість обладнання. Виконання в режимі реального часу призведе до наступного етапу розвитку, кіберфізичної системи, тоді фахівець з обслуговування OEM зможе не тільки контролювати стан системи АМВ і діагностувати проблеми, але й зможе виправляти проблеми, змінюючи закон керування

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. –303с. ISBN 966-7199-99-1.
2. Цзюнь Чжен, Аббас Джамаліпур, «Бездротові сенсорні мережі: мережева перспектива», Wiley India, 1-е видання, 2014 р.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 1999. – 275с. ISBN 966-7199-67-3.
4. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Сенсори тиску і магнітного поля. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2005. –207 с. ISBN 966-641-121-0.
5. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О., Коваль К.О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. –Вінниця: ВНТУ, 2011. – 336с. ISBN 978-966-641-405-5.
6. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Монографія. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2009. – 182 с. ISBN 978-966-641-315-7
7. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом. Монографія. –Вінниця: ВНТУ, 2013. – 261 с. ISBN 978-966-641-530-4
8. Waltenegus Dargie, Christian Poellabauer, "Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice", John Wiley & Sons, 1st Edition, 2010.
9. Едгар Х. Каллавей, «Бездротові сенсорні мережі: архітектури та протоколи», CRC Press, 1-е видання, серпень 2003 р.
10. Wang, Y.; Hu, J.; Lin, Y.; Nan, C.-W. Multiferroic Magnetoelectric Composite Nanostructures. *NPG Asia Mater.* 2010, 2, 61–68.
11. Priya, S.; Islam, R.; Dong, S.; Viehland, D. Recent Advancements in Magnetoelectric Particulate and Laminate Composites. *J. Electroceramics* 2007, 19, 149–166.
12. Palneedi, H.; Annapureddy, V.; Priya, S.; Ryu, J. Status and Perspectives of Multiferroic Magnetoelectric Composite Materials and Applications. *Actuators* 2016, 5, 9.
13. Nan, C.-W.; Bichurin, M.I.; Dong, S.; Viehland, D.; Srinivasan, G. Multiferroic Magnetoelectric Composites: Historical Perspective, Status, and Future Directions. *J. Appl. Phys.* 2008, 103, 31101.
14. Vaz, C.A.F.; Hoffman, J.; Ahn, C.H.; Ramesh, R. Magnetoelectric Coupling Effects in Multiferroic Complex Oxide Composite Structures. *Adv. Mater.* 2010, 22, 2900–2918.

15. Ryu, J.; Kang, J.-E.; Zhou, Y.; Choi, S.-Y.; Yoon, W.-H.; Park, D.-S.; Choi, J.-J.; Hahn, B.-D.; Ahn, C.-W.; Kim, J.-W.; et al. Ubiquitous Magneto-Mechano-Electric Generator. *Energy Environ. Sci.* 2015, 8, 2402–2408.
16. Lim, K.-W.; Peddigari, M.; Park, C.H.; Lee, H.Y.; Min, Y.; Kim, J.-W.; Ahn, C.-W.; Choi, J.-J.; Hahn, B.-D.; Choi, J.-H.; et al. A High Output Magneto-Mechano-Triboelectric Generator Enabled by Accelerated Water-Soluble Nano-Bullets for Powering a Wireless Indoor Positioning System. *Energy Environ. Sci.* 2019, 12, 666–674.
17. Annapureddy, V.; Kim, M.; Palneedi, H.; Lee, H.-Y.; Choi, S.-Y.; Yoon, W.-H.; Park, D.-S.; Choi, J.-J.; Hahn, B.-D.; Ahn, C.-W.; et al. Low-Loss Piezoelectric Single-Crystal Fibers for Enhanced Magnetic Energy Harvesting with Magnetoelectric Composite. *Adv. Energy Mater.* 2016, 6, 1601244.
18. Kwak, M.S.; Lim, K.-W.; Lee, H.Y.; Peddigari, M.; Jang, J.; Jeong, C.K.; Ryu, J.; Yoon, W.-H.; Yi, S.N.; Hwang, G.-T. Multiscale Surface Modified Magneto-Mechano-Triboelectric Nanogenerator Enabled by Eco-Friendly NaCl Imprinting Stamp for Self-Powered IoT Applications. *Nanoscale* 2021, 13, 8418–8424.
19. Kang, M.G.; Sriramdas, R.; Lee, H.; Chun, J.; Maurya, D.; Hwang, G.T.; Ryu, J.; Priya, S. High Power Magnetic Field Energy Harvesting through Amplified Magneto-Mechanical Vibration. *Adv. Energy Mater.* 2018, 8, 1703313.
20. Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G. The Internet of Things: A Survey. *Comput. Networks* 2010, 54, 2787–2805.
21. Gubbi, J.; Buyya, R.; Marusic, S.; Palaniswami, M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. *Futur. Gener. Comput. Syst.* 2013, 29, 1645–1660.
22. Haight, R.; Haensch, W.; Friedman, D. Solar-Powering the Internet of Things. *Science* 2016, 353, 124–125.
23. Hwang, G.-T.; Annapureddy, V.; Han, J.H.; Joe, D.J.; Baek, C.; Park, D.Y.; Kim, D.H.; Park, J.H.; Jeong, C.K.; Park, K.-I.; et al. Self-Powered Wireless Sensor Node Enabled by an Aerosol-Deposited PZT Flexible Energy Harvester. *Adv. Energy Mater.* 2016, 6, 1600237.
24. Lee, H.; Sriramdas, R.; Kumar, P.; Sanghadasa, M.; Kang, M.G.; Priya, S. Maximizing Power Generation from Ambient Stray Magnetic Fields around Smart Infrastructures Enabling Self-Powered Wireless Devices. *Energy Environ. Sci.* 2020, 13, 1462–1472.
25. Peddigari, M.; Woo, K.; Kim, S.-D.; Kwak, M.S.; Jeong, J.W.; Kang, J.-H.; Lee, S.-H.; Park, J.H.; Park, K.-I.; Annapureddy, V.; et al. Ultra-Magnetic Field Sensitive Magnetoelectric Composite with Sub-PT Detection Limit at Low Frequency Enabled by Flash Photon Annealing. *Nano Energy* 2021, 90, 106598.
26. Lyu, H.; Bae, Y.S.; Vijayakumaran Nair, V.; Choi, J.R. High Inductance Coil Embedded on On-Chip Magnetic Sensor for Biomagnetism Measurements. In Proceedings of the 2014 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Queenstown, New Zealand, 18–20 February 2014; pp. 79–82.

27. Fagaly, R.L. Superconducting Quantum Interference Device Instruments and Applications. *Rev. Sci. Instrum.* 2006, 77, 101101.
28. Xi, H.; Qian, X.; Lu, M.-C.; Mei, L.; Rupprecht, S.; Yang, Q.X.; Zhang, Q.M. A Room Temperature Ultrasensitive Magnetoelectric Susceptometer for Quantitative Tissue Iron Detection. *Sci. Rep.* 2016, 6, 29740.
29. Annapureddy, V.; Palneedi, H.; Yoon, W.-H.; Park, D.-S.; Choi, J.-J.; Hahn, B.-D.; Ahn, C.-W.; Kim, J.-W.; Jeong, D.-Y.; Ryu, J. A $\text{PT}/\sqrt{\text{Hz}}$ Sensitivity Ac Magnetic Field Sensor Based on Magnetoelectric Composites Using Low-Loss Piezoelectric Single Crystals. *Sens. Actuators A Phys.* 2017, 260, 206–211.
30. Chu, Z.; Shi, H.; Shi, W.; Liu, G.; Wu, J.; Yang, J.; Dong, S. Enhanced Resonance Magnetoelectric Coupling in (1–1) Connectivity Composites. *Adv. Mater.* 2017, 29, 1606022.
31. Chu, Z.; Shi, W.; Shi, H.; Chen, Q.; Wang, L.; PourhosseiniAsl, M.J.; Xiao, C.; Xie, T.; Dong, S. A 1D Magnetoelectric Sensor Array for Magnetic Sketching. *Adv. Mater. Technol.* 2019, 4, 1800484.
32. Kambale, R.C.; Yoon, W.-H.; Park, D.-S.; Choi, J.-J.; Ahn, C.-W.; Kim, J.-W.; Hahn, B.-D.; Jeong, D.-Y.; Lee, B.C.B.; Chung, G.-S.; et al. Magnetoelectric Properties and Magnetomechanical Energy Harvesting from Stray Vibration and Electromagnetic Wave by $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ Single Crystal/Ni Cantilever. *J. Appl. Phys.* 2013, 113, 204108.
33. Ma, J.; Hu, J.; Li, Z.; Nan, C.-W. Recent Progress in Multiferroic Magnetoelectric Composites: From Bulk to Thin Films. *Adv. Mater.* 2011, 23, 1062–1087.
34. *IEEE 1859-2017*; IEEE Standard for Relaxor-Based Single Crystals for Transducer and Actuator Application. IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2006.
35. Park, S.-E.; Shrout, T.R. Ultrahigh Strain and Piezoelectric Behavior in Relaxor Based Ferroelectric Single Crystals. *J. Appl. Phys.* 1997, 82, 1804–1811.
36. Rajaram Patil, D.; Chai, Y.; Kambale, R.C.; Jeon, B.-G.; Yoo, K.; Ryu, J.; Yoon, W.-H.; Park, D.-S.; Jeong, D.-Y.; Lee, S.-G.; et al. Enhancement of Resonant and Non-Resonant Magnetoelectric Coupling in Multiferroic Laminates with Anisotropic Piezoelectric Properties. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 102, 62909.
37. Fu, H.; Cohen, R.E. Polarization Rotation Mechanism for Ultrahigh Electromechanical Response in Single-Crystal Piezoelectrics. *Nature* 2000, 403, 281–283.
38. Sun, E.; Cao, W. Relaxor-Based Ferroelectric Single Crystals: Growth, Domain Engineering, Characterization and Applications. *Prog. Mater. Sci.* 2014, 65, 124–210.
39. Cowley, R.A.; Gvasaliya, S.N.; Lushnikov, S.G.; Roessli, B.; Rotaru, G.M. Relaxing with Relaxors: A Review of Relaxor Ferroelectrics. *Adv. Phys.* 2011, 60, 229–327.
40. Zhang, S.; Zhao, Y.; Xiao, X.; Wu, Y.; Rizwan, S.; Yang, L.; Li, P.; Wang, J.; Zhu, M.; Zhang, H.; et al. Giant Electrical Modulation of Magnetization in

- $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}/\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.7}\text{Ti}_{0.3}\text{O}_3$ (011) Heterostructure. *Sci. Rep.* 2014, 4, 3727.
41. Palneedi, H.; Annapureddy, V.; Lee, H.-Y.; Choi, J.-J.; Choi, S.-Y.; Chung, S.-Y.; Kang, S.-J.L.; Ryu, J. Strong and Anisotropic Magnetoelectricity in Composites of Magnetostrictive Ni and Solid-State Grown Lead-Free Piezoelectric BZT–BCT Single Crystals. *J. Asian Ceram. Soc.* 2017, 5, 36–41.
 42. Usman, K.; Abu-Dieyeh, M.H.; Zouari, N.; Al-Ghouti, M.A. Lead (Pb) Bioaccumulation and Antioxidative Responses in Tetraena Qataranse. *Sci. Rep.* 2020, 10, 17070.
 43. Maurya, D.; Peddigari, M.; Kang, M.-G.; Geng, L.D.; Sharpes, N.; Annapureddy, V.; Palneedi, H.; Sriramdas, R.; Yan, Y.; Song, H.-C.; et al. Lead-Free Piezoelectric Materials and Composites for High Power Density Energy Harvesting. *J. Mater. Res.* 2018, 33, 2235–2263. Maffei, M.E. Magnetic Fields and Cancer: Epidemiology, Cellular Biology, and Theranostics. *Int. J. Mol. Sci.* **2022**, 23, 1339.
 44. Park, J.K.; Jeong, E.H.; Seomun, G.A. Extremely Low-Frequency Magnetic Fields Exposure Measurement during Lessons in Elementary Schools. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, 17, 5284.
 45. Metz, R. Build this Magnetic Field Meter. In *Radio Electronics-Electronic Experimenter's Handbook*; 1993; Available online: https://www.industrial-electronics.com/re_elec-exp-hndbk_magnetic.html (accessed on 9 November 2023).
 46. Stratakis, D.; Miaoudakis, A.; Katsidis, C.; Zacharopoulos, V.; Xenos, T. On the uncertainty estimation of electromagnetic field measurements using field sensors: A general approach. *Radiat. Prot. Dosim.* **2009**, 133, 240–247.
 47. ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys.* **2010**, 99, 818–836.
 48. EU. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). *Off. J. Eur. Union* **2013**, 2013, 1–21.
 49. Trentadue, G.; Zanni, M.; Martini, G. Assessment of low-frequency magnetic fields in electrified vehicles. In *EUR 30198 EN*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2020.
 50. Bonekamp, H. Magnetic—Field Meter. In *Elektor Magazine*; 1997; p. 26. Available online: <https://www.elektormagazine.com/magazine/elektor-199701/33758> (accessed on 9 November 2023).
 51. David, V.; Antoniou, M.; Cretu, M.; Salceanu, A. An isotropic sensor for the measurement of low frequency electric and magnetic fields. In Proceedings of the Conference Digest Conference on Precision Electromagnetic Measurements, Ottawa, ON, Canada, 16–21 June 2002; pp. 20–21.
 52. Petrascu, C.; Tulbure, A.; Topa, V. Implementation of an Accurate Measurement Method for the Spatial Distribution of the Electromagnetic Field in a WPT System. *Appl. Sci.* **2023**, 13, 5773.

53. Narda PMM 8053A; The Solutions for Every Electrosmog Problem from 5 Hz up to 40 GHz, User Manual. 2004. Available online: <http://www.gruppompb.uk.com/public/upload/8053BEN-40918-3.16.pdf>
54. Narda EHP-50C; Electric and Magnetic Field Probe-Analyzer from 5 Hz up to 100 kHz, User Manual. 2009. Available online: https://www.gruppompb.com/public/upload/manuale-v-1_32-ehp-50-c.pdf
55. Mavromatis, F.; Boursianis, A.; Samaras, T.; Koukourlis, C.; Sahalos, J.N. A Broadband Monitoring System for Electromagnetic-Radiation Assessment. *IEEE Antennas Propag. Mag.* **2009**, *51*, 71–79.
56. “FASMA” EMF Project—Wind Telecommunications SA. Available online: <https://www.wind.gr/>.
57. “HERMES” EMF Project—Vodafone Telecommunications. Available online: <http://www.hermes.ntua.gr/>
58. “Pedion 24” EMF Project—Cosmote Telecommunications. Available online: <http://www.pedion24.gr/>
59. “National Observatory of Electromagnetic Fields-NOEF” EMF Project-Greek Atomic Energy Commission. Available online: <https://paratiritirioemf.eeae.gr>
60. Narda AMS-8061; Selective Area Monitor—User Manual. Available online: <https://www.narda-sts.com/en/selective-emf/ams-8061/pd/pdfs/23219/eID/>
61. Narda AMB-8059; Multi-Band Area Monitor—User Manual. Available online: <https://www.narda-sts.com/>
62. Narda AMB 8057-03/G; Broadband Area Monitor—User Manual. Available online: <https://www.narda-sts.com/en/selective-emf/>
63. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
64. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028
65. 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
66. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
67. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
68. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

69. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
70. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
71. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14_nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html
72. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php
73. ДСТУ Б В.2.5-82:2016 Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом- [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65395

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-22м
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіо-
техніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

 Крапля В.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС

 Осадчук Я.О.
(прізвище та ініціали)

«06» 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

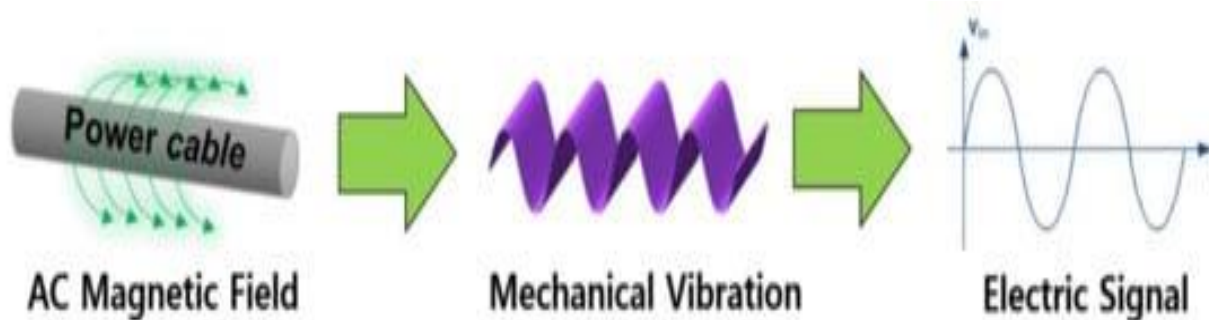


Рисунок 1 – Механізм роботи магнітомеханоелектричного перетворення

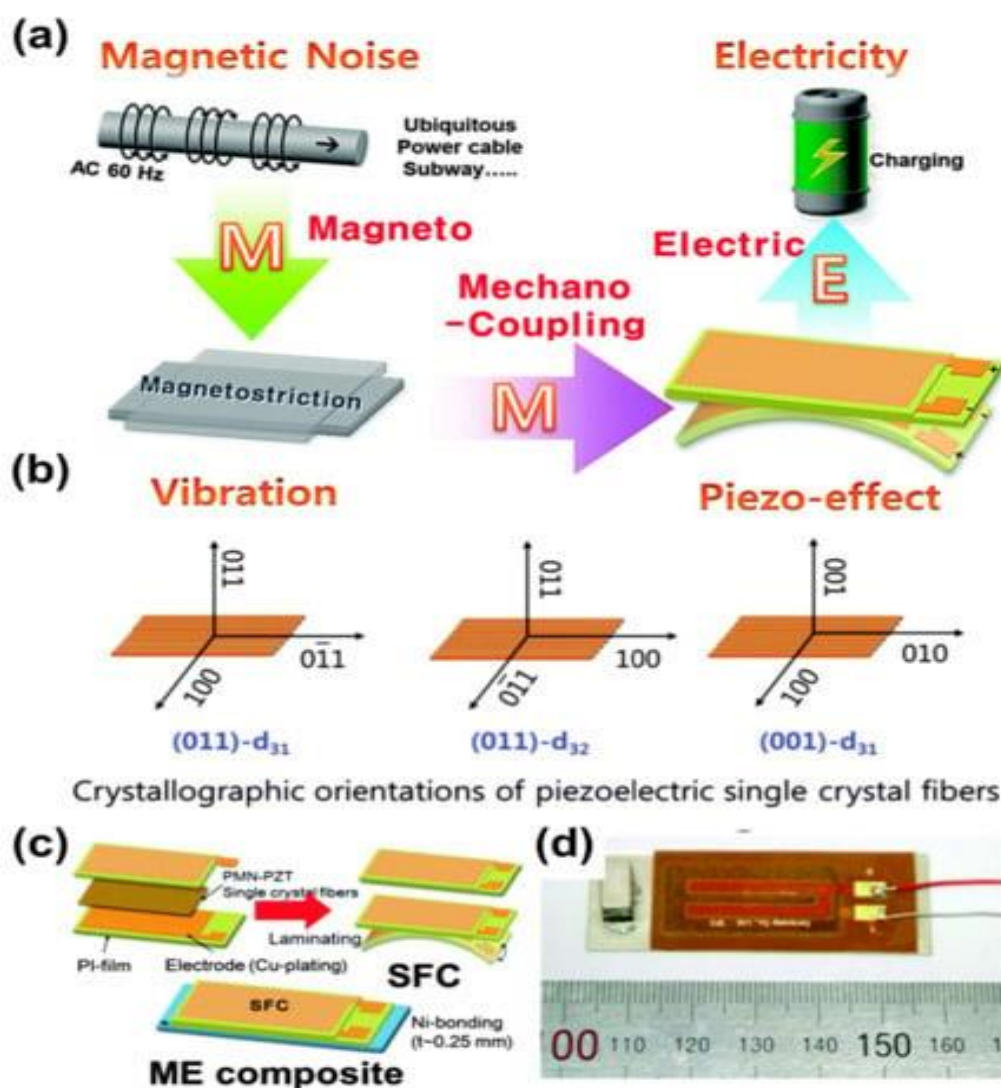


Рисунок 2 – (а) Принципова схема процесу передачі енергії в генераторі ММЕ з МЕ композитами. (б) Схематична діаграма кристалографічних орієнтацій п'єзоелектричних монокристалічних волокон, що використовуються в МЕ композитах. (с) Схематична діаграма етапів виготовлення композиту МЕ (д) Фотокопія розробленого генератора ММЕ з підтвердженням маси Nd

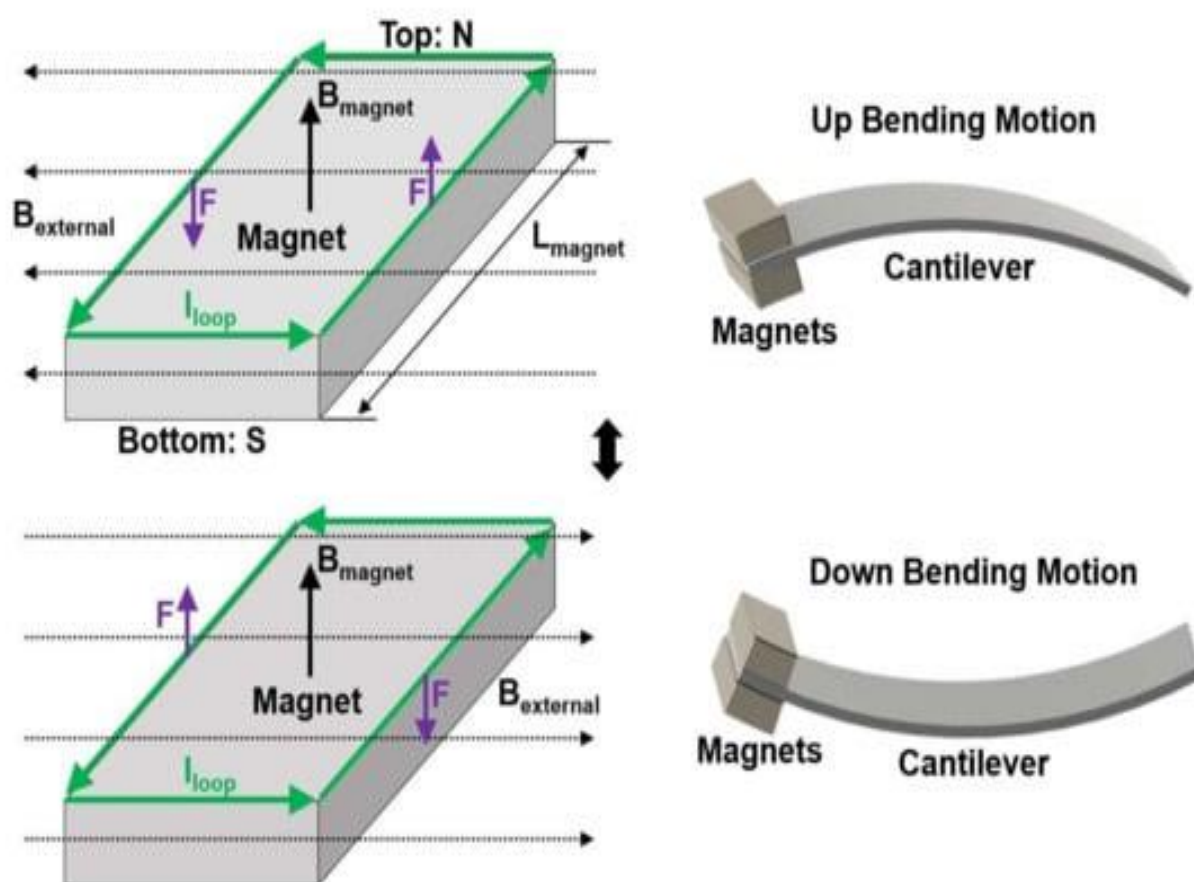


Рисунок 3 – Схема механізму механічної вібрації на кантилевері ММЕ з поворотом проти годинникової стрілки та за годинниковою стрілкою на масових магнітах під впливом зовнішнього змінного магнітного поля

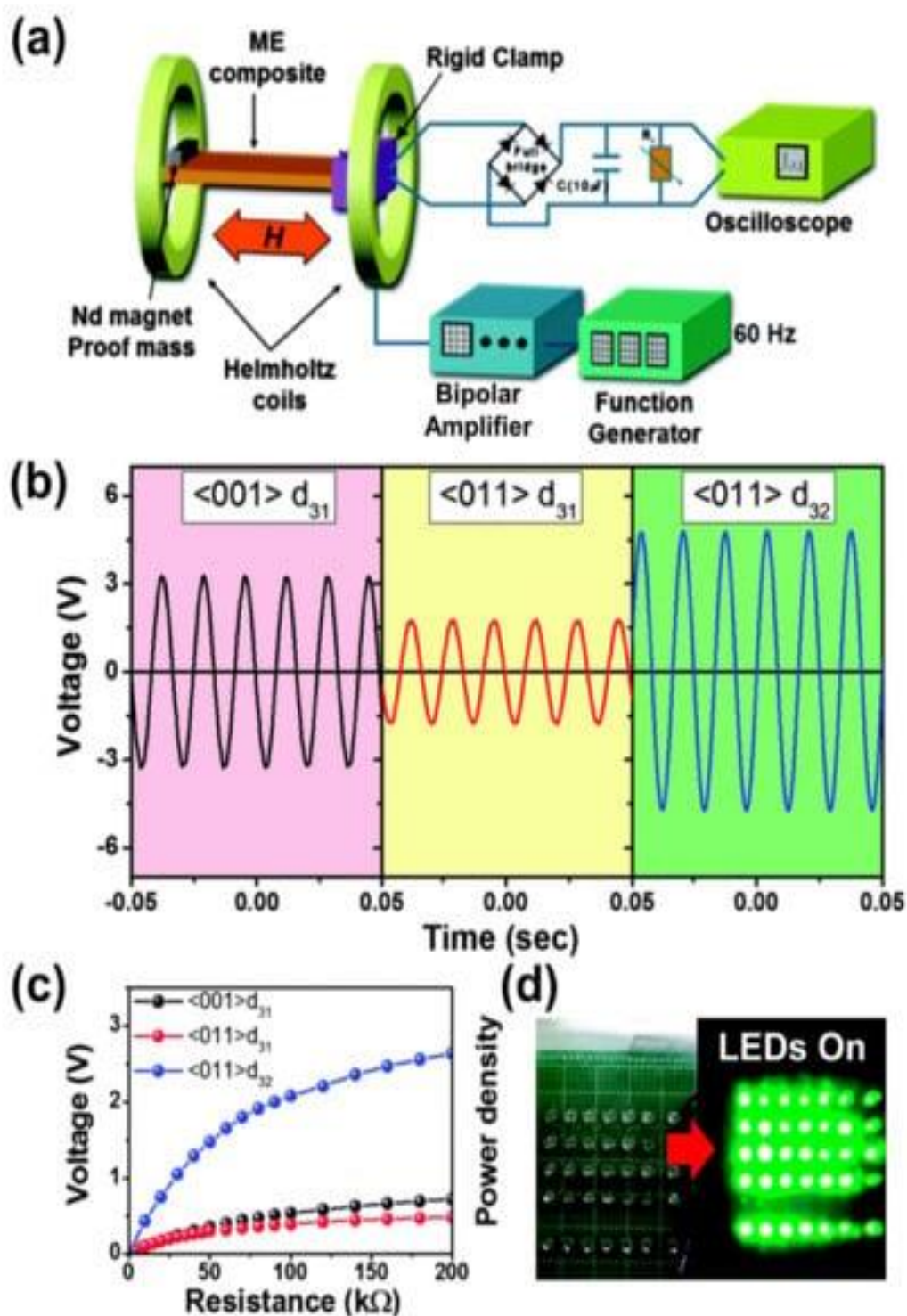


Рисунок 4 – (а) Принципова схема установки вимірювання генератора ММЕ. (б) Відгук вихідної напруги від генератора ММЕ з вбудованим $\langle 011 \rangle$ SFC у режимі d_{32} при 160 мкТ і 60 Гц. (с) Випрямлена напруга як функція опору навантаження для різних орієнтацій з модами. (д) Фотографія 35 світлодіодів із частотою вмикання/вимкнення 1 Гц за допомогою потужності, отриманої від генератора ММЕ

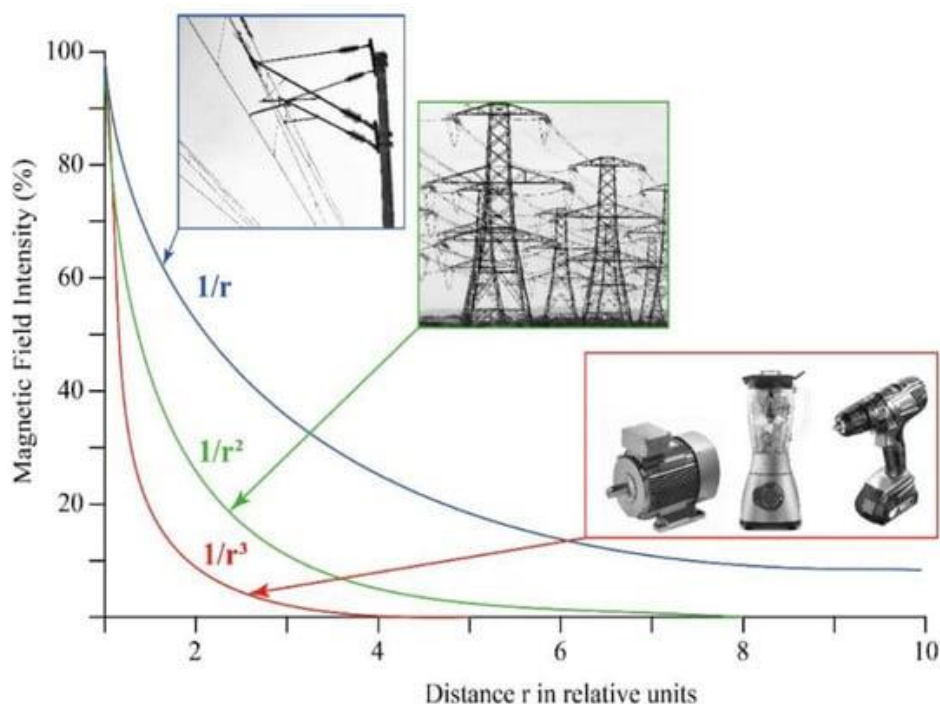


Рисунок 5 – Напруженість магнітного поля зменшується зі збільшенням відстані від поля з швидким ($1/r^3$, $1/r^2$) або повільним ($1/r$) спаданням

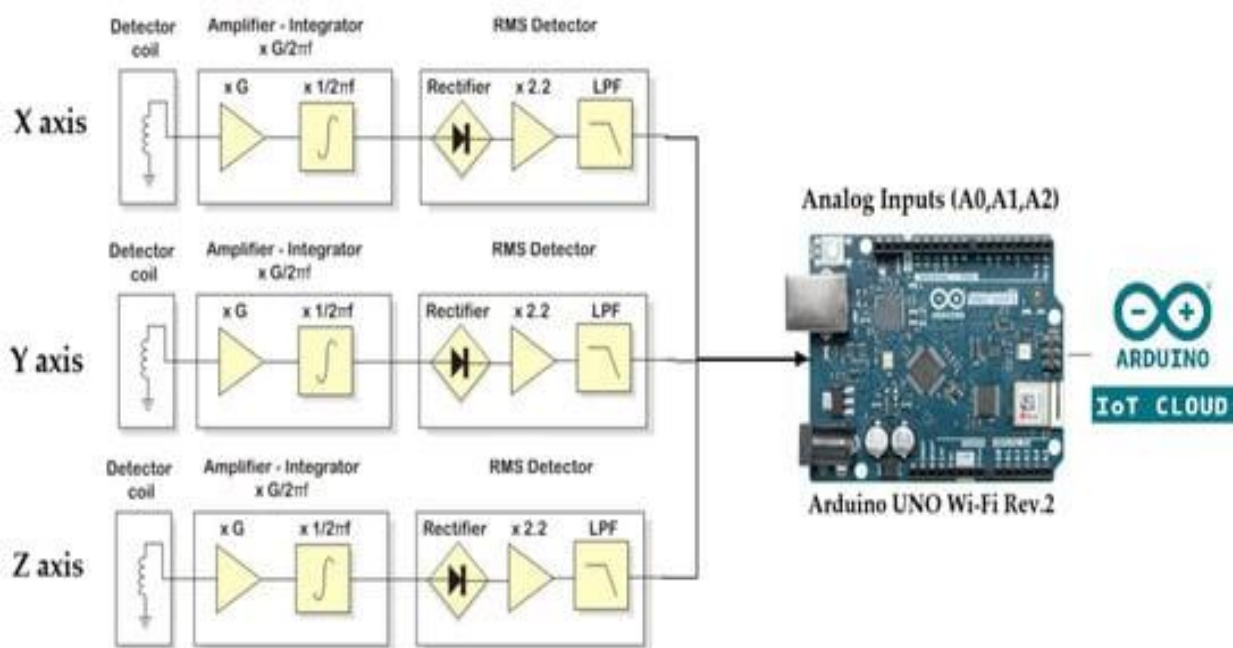


Рисунок 6 – Блок-схема запропонованого ізотропного вимірювача щільності магнітного потоку на основі IoT. Плата Arduino UNO Wi-Fi Rev.2 використовується для забезпечення 3 аналогових входів для вимірювань по осях X, Y і Z і підключення Wi-Fi, покращуючи попередню версію датчика

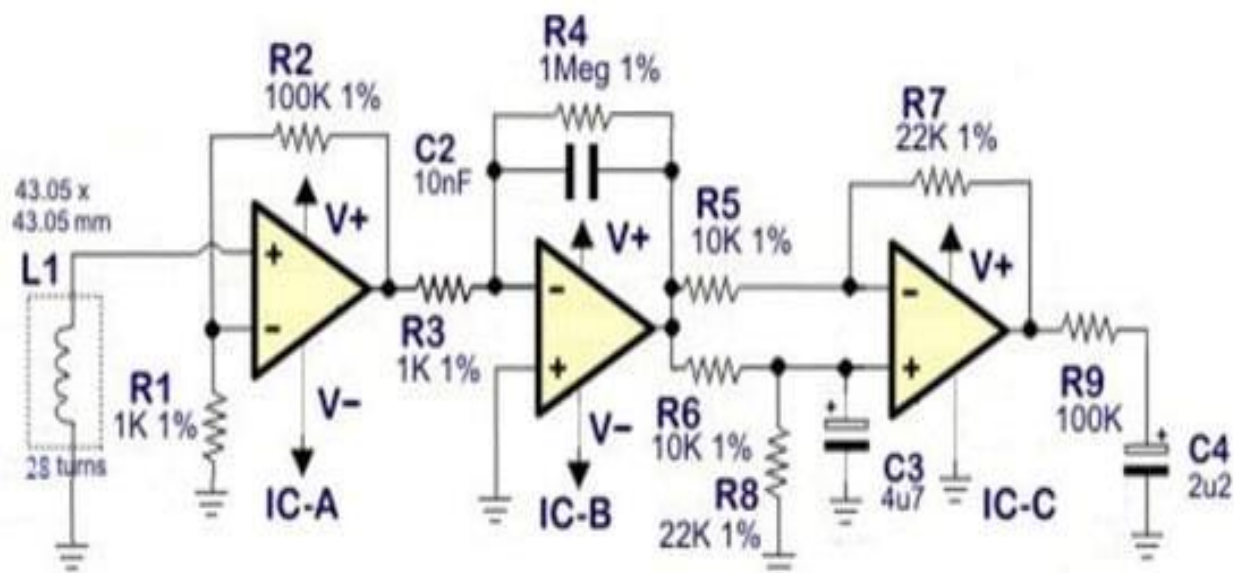


Рисунок 7 – Принципова електронна схема запропонованого вимірювача магнітної індукції. Для реалізації ізотропного лічильника також необхідні 3 ідентичні схеми для вимірювання КНЧ в площинах X, Y і Z

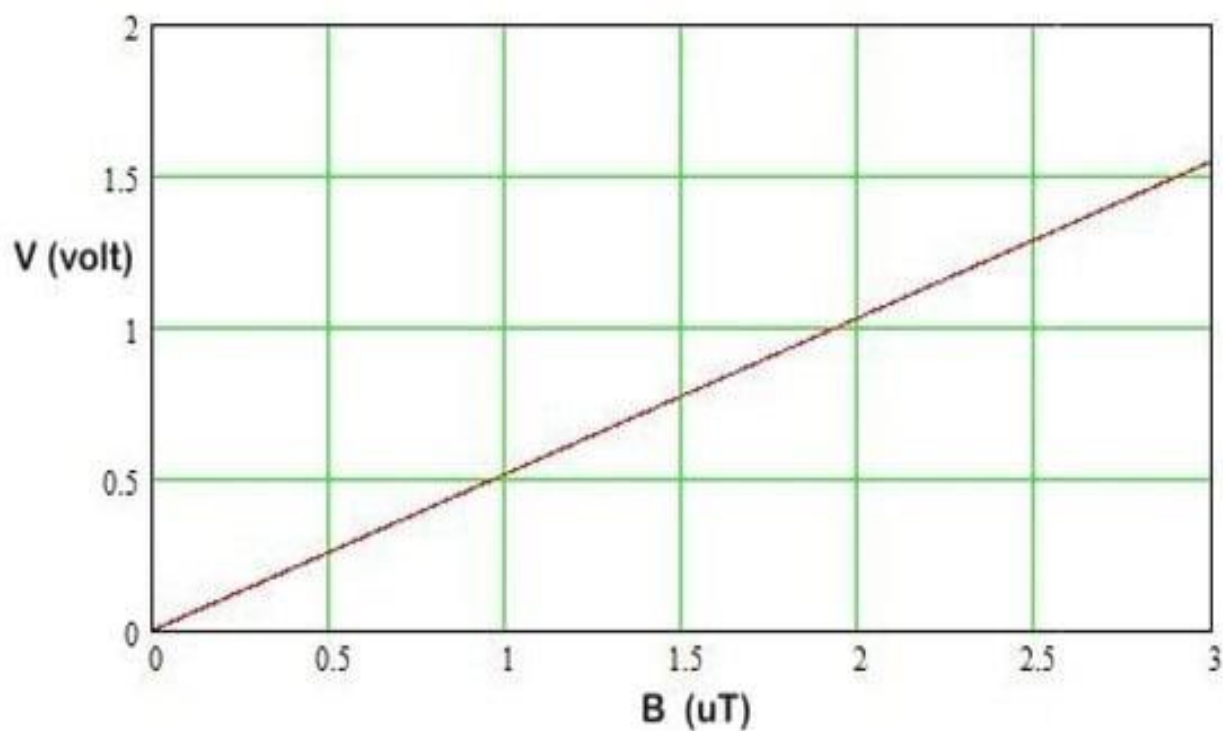


Рисунок 8 – Вихідна напруга запропонованого RMS детектора є функцією щільності магнітного потоку

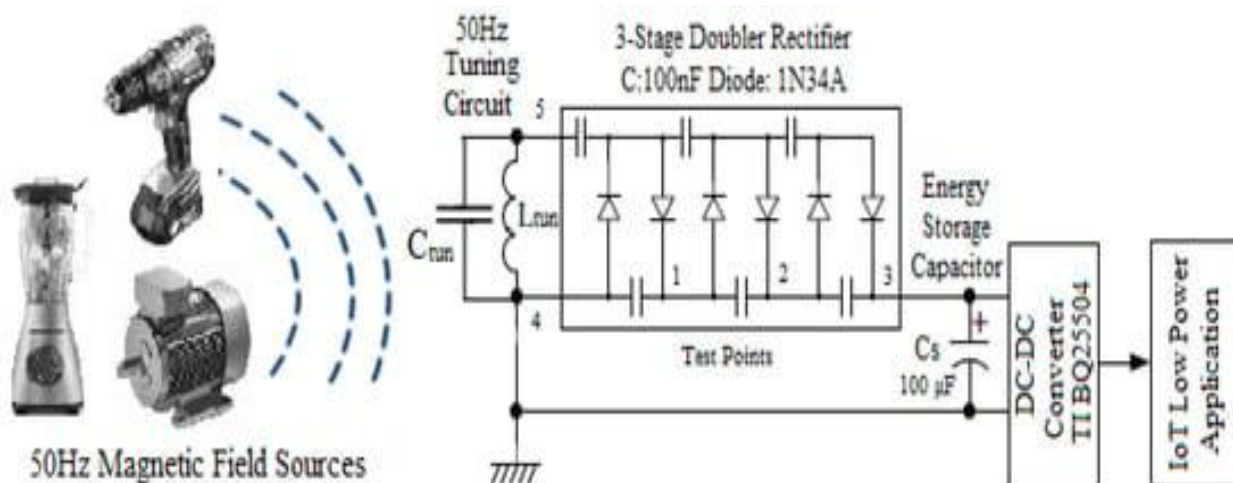


Рисунок 9 – Електронна схема запропонованої системи збору енергії ELF і деяких джерел магнітного поля. Тестові точки 1, 2 і 3 відповідають окремим ступеням випрямляча

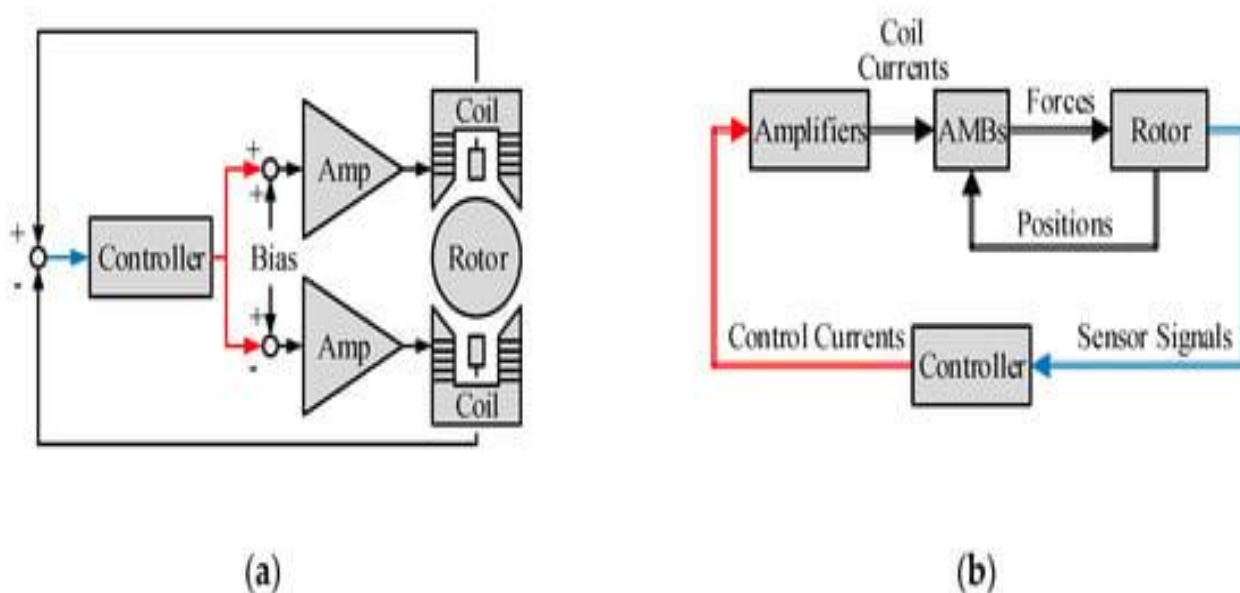


Рисунок 10 – Типова схема керування АМВ: (а) зміщення однієї осі керування; та (б) блок-схема управління МІМО

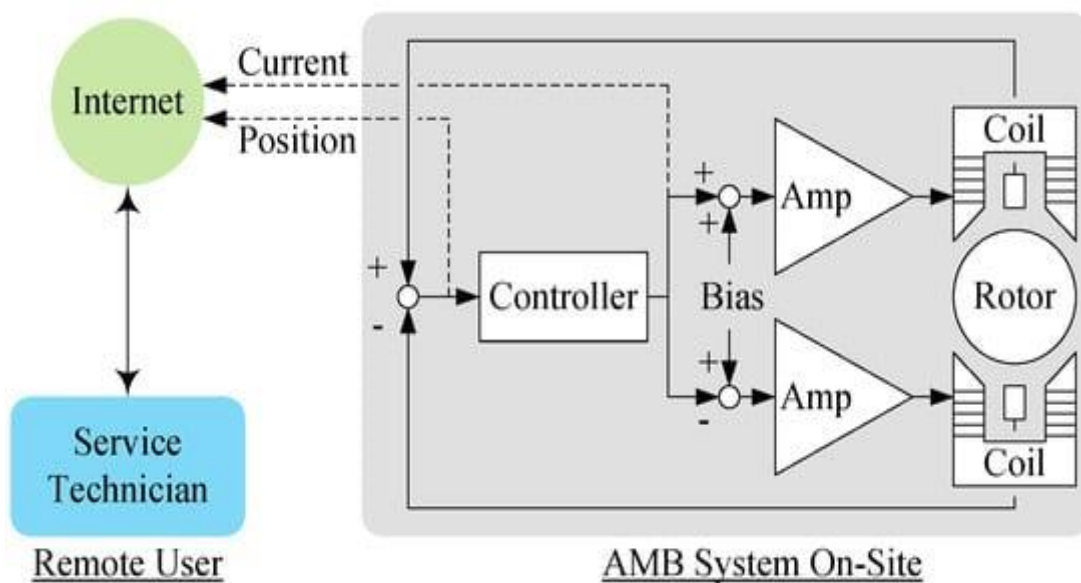


Рисунок 11 – Моніторинг стану системи АМВ через концепцію IoT

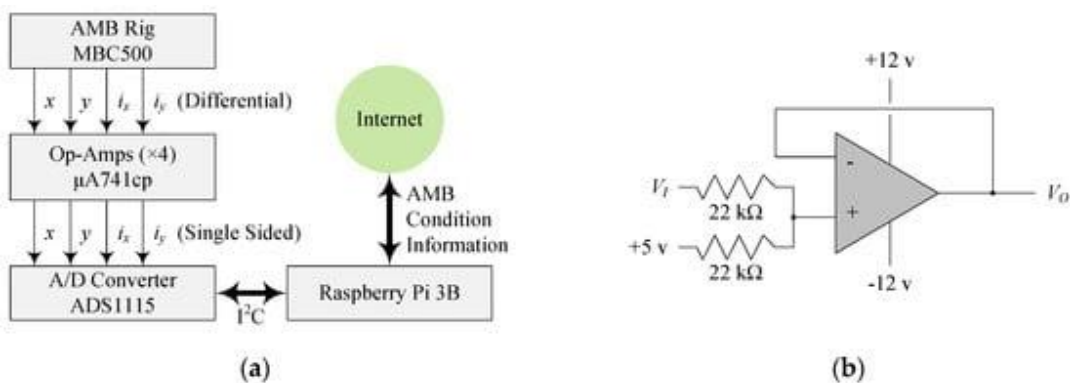


Рисунок 12 – Апаратне забезпечення, додане для реалізації IoT: (а) загальна схема; та (б) схема підключення операційного підсилювача

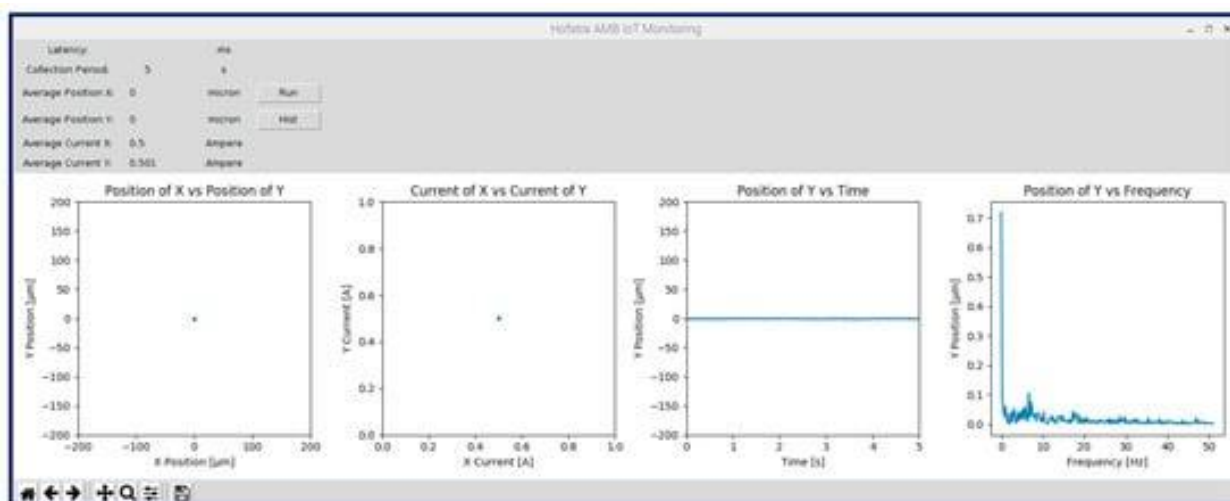


Рисунок 13– Графічний інтерфейс моніторингу стану АМВ IoT для необертового оголеного вала

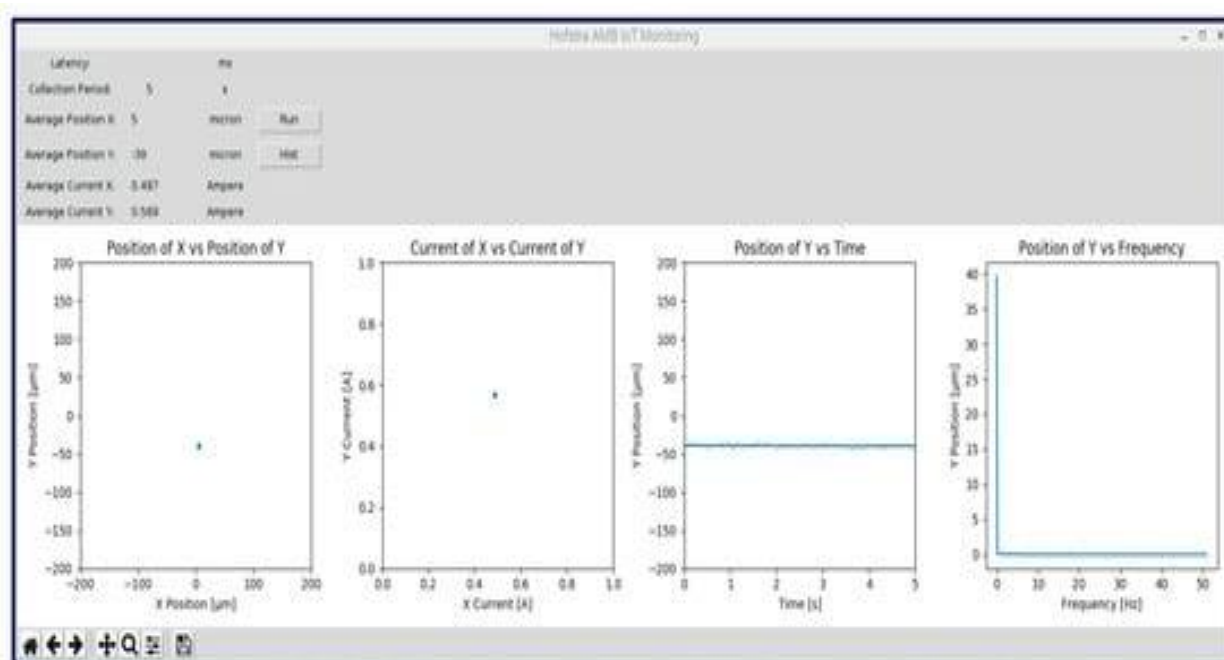


Рисунок 14 – Графічний інтерфейс моніторингу стану АМВ IoT для неповоротного вала з двома манжетами

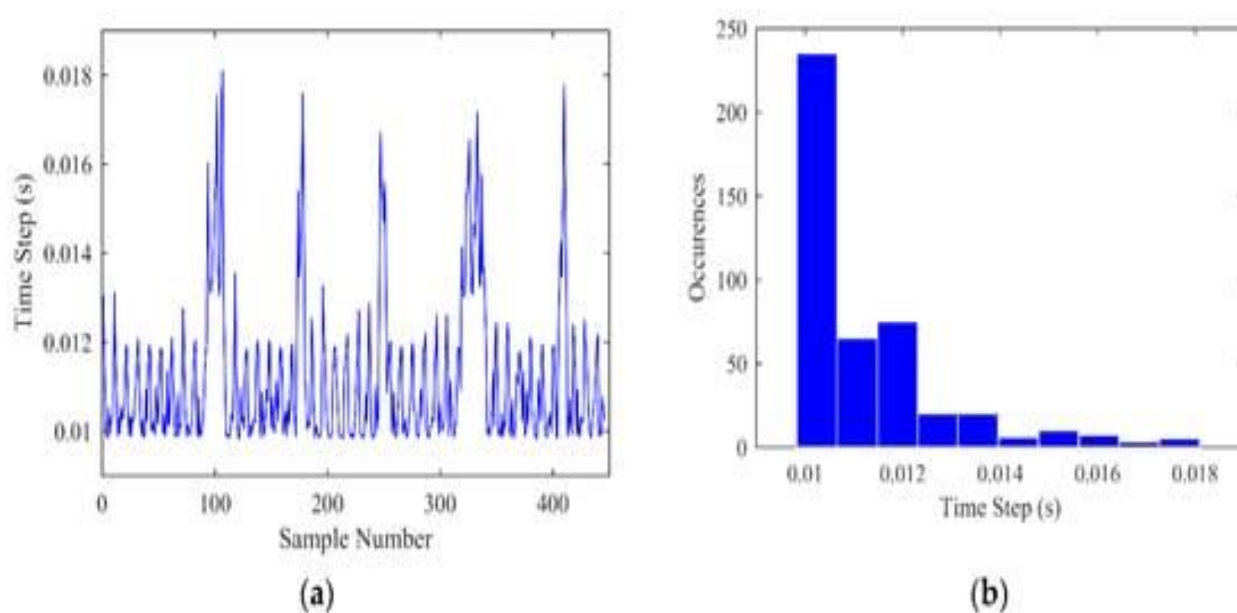


Рисунок 15 – Характерний час вибірки для 5 с даних IoT: (а) історія часу; і (б) гістограма

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ІОТ
СИСТЕМ**

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Радіовимірювальні сенсори магнітного поля для IoT систем»

Тип роботи: МКР
(БДР, МКР)

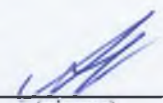
Підрозділ ІРТС, ІЕС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichек

Оригінальність 99,78% Схожість 0,22%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Олександр ЗВЯГІН
(прізвище, ініціали)

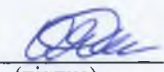
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichек щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Віталій КРАПЛЯ
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Ярослав ОСАДЧУК
(прізвище, ініціали)