

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:
**«БАГАТОКАНАЛЬНИЙ РАДІОТЕХНІЧНИЙ ПРИСТРІЙ
МОНІТОРИНГУ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ»**

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-24м
спеціальності 172 Електронні комунікації та
радіотехніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кутушонок А.О.
(прізвище та ініціали)

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

Осадчук Я.О.
(прізвище та ініціали)

«12» 12 2025 р.

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

Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)

«15» 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«16» 12 2025 р.

Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність – 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кутушонку Андрію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Багатоканальний радіотехнічний пристрій моніторингу фізичних величин для IoT систем»

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

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 24. 09.2025 р. №313.

2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: Динамічний діапазон вимірювання (амплітуда від сотень В/м до десятків кВ/м), час відгуку порядку наносекунд; ширина смуги пропускання до 1 ГГц; аналогова смуга пропускання системи охоплює спектр від постійного струму та частоти живлення 50 Гц до сигналів часткових розрядів, від постійного струму до 1,65 ГГц, з глибиною зберігання 2 ГБ.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Бездротові пристрої моніторингу фізичних величин для IoT систем. Багатоканальний радіотехнічний пристрій моніторингу електромагнітних перехідних процесів для IoT систем. Теоретичні основи спектрального аналізу. Економічна частина. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Принципова схема гнучкого енергетичного комбайна на ранніх етапах використання. Структура та принцип роботи наногенератора. Схема розташування датчиків із автономним живленням. Блок-схема бездротової вимірювальної системи. Принципова схема схеми кондиціонування. Функціональна блок-схема високошвидкісної цифрової системи збору даних. Апроксимована крива коефіцієнта перетворення. Віконне перетворення Фур'є. Вікно моделювання в DSP System Toolbox.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	Осадчук Я.О. доцент каф. ІРТС, доцент, д.т.н.		
Економічна частина	Козловський В.О. професор каф. ЕПВМ, професор, к.е.н.		

7. Дата видачі завдання 16.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2025-07.09.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2025-16.09.2025	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка індивідуального завдання на МКР.	17.09.2025-24.09.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.10.2025-20.10.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	21.10.2025-04.11.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини МКР.	05.11.2025-12.11.2025	
7.	Економічна частина.	13.11.2025-23.11.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	24.11.2025-28.11.2025	
9.	Нормоконтроль.	29.11.2025-03.12.2025	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	04.12.2025-15.12.2025	
11.	Захист МКР ЕК.	17.12.2025-18.12.2025	

Студент


(підпис)

Кутушонок А.О.

Керівник роботи


(підпис)

Осадчук Я.О.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Кутушонок А.О. Багатоканальний радіотехнічний пристрій моніторингу фізичних величин для IoT систем. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 97с. На українській мові. Бібліогр.: 42 назв; Табл.: 16; Рис.35.

У магістерській кваліфікаційній роботі в першому розділі проведено аналіз бездротових сенсорів фізичних величин. Під час проектування автоматичних та портативних систем узгодження імпедансу необхідно запропонувати ефективні рішення для підвищення зручності використання пасивних бездротових датчиків, такі як збільшення відстані зчитування та підвищення точності зчитування. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на дослідженні топологій бездротових сенсорних мереж та розробці нових алгоритмів для зменшення втрат енергії та мінімізації вимог до нано-пристроїв збору.

Другий розділ присвячений питанням вимірювання широкосмугових сигналів перехідного електричного поля та розгляду технології вимірювання електромагнітних імпульсів на основі методів високошвидкісної цифрової дискретизації з використанням FPGA. Досліджено конструкцію мініатюрного датчика перехідного електричного поля на основі електрично малої монопольної антени та розробляються відповідні схеми надширокосмугового вимірювання.

Представлена технологія локальної високошвидкісної цифрової дискретизації на основі FPGA, що дозволяє цифрову дискретизацію вимірюваних аналогових сигналів. Базуючись на принципі роботи стрижневої електрично малої антени, досліджено та оптимізовано конструкцію схеми формування індукованої напруги електричної дипольної антени, розширивши аналогову смугу пропускання датчика з початкових 1 кГц до 460 МГц до надширокої смуги пропускання від постійного струму до понад 1,6 ГГц. Також представлено методику калібрування системи вимірювання перехідного електричного поля в часовій області.

В третьому розділі представлено методи спектрального аналізу експериментальних даних в середовищі Matlab та в DSP System Toolbox.

Ключові слова: багатоканальний радіотехнічний пристрій, вимірювання широкосмугових сигналів перехідного електричного поля, бездротові сенсорні мережі, FPGA.

ANNOTATION

Kutushonok A.O. Multi-channel radio-technical device for monitoring physical quantities for IoT systems. Master's qualification work. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 97p. In Ukrainian. Bibliography: 42 titles; Fig.35.

In the master's qualification work, the first section analyzes wireless sensors of physical quantities. When designing automatic and portable impedance matching systems, it is necessary to offer effective solutions to improve the usability of passive wireless sensors, such as increasing the reading distance and increasing the reading accuracy. Further research should focus on studying the topologies of wireless sensor networks and developing new algorithms to reduce energy losses and minimize the requirements for nano-collection devices.

The second section is devoted to the issues of measuring broadband signals of a transient electric field and considering the technology for measuring electromagnetic pulses based on high-speed digital sampling methods using FPGA. The design of a miniature transient electric field sensor based on an electrically small monopole antenna is investigated and the corresponding ultra-wideband measurement schemes are developed.

The technology of local high-speed digital sampling based on FPGA is presented, which allows digital sampling of measured analog signals. Based on the principle of operation of a rod electrically small antenna, the design of the induced voltage formation circuit of an electric dipole antenna is investigated and optimized, expanding the analog bandwidth of the sensor from the initial 1 kHz to 460 MHz to an ultra-wide bandwidth from DC to over 1.6 GHz. The method of calibrating the transient electric field measurement system in the time domain is also presented.

The third section presents methods of spectral analysis of experimental data in the Matlab environment and in the DSP System Toolbox.

Keywords: multi-channel radio engineering device, measurement of broadband transient electric field signals, wireless sensor networks, FPGA.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 БЕЗДРОТОВІ ПРИСТРОЇ МОНІТОРИНГУ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ	11
1.1 Бездротові сенсорні пристрої для збору енергії з автономним живленням	12
1.2 Алгоритми обробки інформативних сигналів	13
1.3 Високопродуктивні гнучкі п'єзоелектричні збирачі енергії на пластикових підкладках	16
1.4 Модулі гнучких термоелектричних генераторів (f-TEG).....	17
1.5 Сенсори на базі високоякісного полімерного покриття на основі полівініліденфториду (PVDF).....	21
1.6 Застосування пасивних бездротових датчиків	25
1.7 Сенсори для тестування здоров'я людини	28
1.8 Сенсори для випробування безпеки.....	32
1.9 Висновки до розділу.....	34
2 БАГАТОКАНАЛЬНИЙ РАДІОТЕХНІЧНИЙ ПРИСТРІЙ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ	36
2.1 Застосування пристроїв моніторингу електромагнітних перехідних процесів.....	37
2.2 Датчик електричного поля	41
2.3 Принцип монопольної малої антени.....	41
2.4 Моделювання сенсора електричного поля	43
2.5 Проектування схеми передавача	44
2.6 Високошвидкісна цифрова система збору даних на основі FPGA	46
2.7 Калібрування датчика електричного поля	50
2.8 Випробування на станції постійного струму високої напруги (HVDC).....	53
2.9 Випробування стаціонарного електричного поля промислової частоти	55
2.10 Висновки до розділу	57
3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ	59
3.1 Основи спектрального аналізу радіотехнічного сигналу.....	59
3.2 Спектральний аналіз сигналів в Matlab.....	61
3.3 Висновки до розділу.....	66
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	69
4.1 Технологічний аудит розробленого багатоканального	

	радіотехнічного пристрою моніторингу фізичних величин (далі – розробки).....	69
4.2	Розрахунок витрат на розроблення багатоканального радіотехнічного пристрою моніторингу фізичних величин.....	74
4.3	Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації нашої розробки.....	78
	ВИСНОВКИ	83
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85
	Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	90
	Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи.....	98

ВСТУП

Актуальність. З постійним розвитком науки і техніки пасивні бездротові датчики відіграють вирішальну роль у численних застосуваннях і привертають увагу дослідників з різних галузей. Вимоги до використання датчиків також зростають, такі як коефіцієнт якості, чутливість і простір використання датчика. Інновації в чутливих матеріалах, таких як напівпровідники та полімерні матеріали, стимулюватимуть розвиток датчиків. Ці датчики використовуються для вимірювання таких параметрів, як тиск, вологість, деформація, температура та значення рН. Завдяки своїм унікальним характеристикам бездротові датчики можна використовувати для моніторингу місць, до яких важко отримати безпосередній доступ, таким чином відіграючи значну роль у повсякденному житті. Працюючи на низьких частотах, зазвичай у діапазоні десятків мегагерц, і використовуючи технологію зв'язку ближнього поля, вони дозволяють передавати дані на короткі відстані та енергію в складних умовах без необхідності активного обладнання, такого як батареї. Вони прості в експлуатації, мають низькі витрати на обслуговування та є екологічно чистими.

У складних електромагнітних середовищах, таких як підстанції, перетворювальні станції в енергетичних системах, а також відсіки літаків, поїздів та автомобілів, випробування на електромагнітну стійкість є надзвичайно важливим. Воно вимагає, щоб датчик електричного поля мав такі характеристики, як широкий динамічний діапазон вимірювання (амплітуда від сотень В/м до десятків кВ/м), висока швидкість відгуку (час відгуку порядку наносекунд або субнаносекунд), широка смуга пропускання (від постійного струму до 1 ГГц і вище), мініатюризація та стійкість до сильних електромагнітних перешкод.

Метою роботи є покращення характеристик багатоканального радіотехнічного пристрою моніторингу фізичних величин для бездротових сенсорних мереж (ІоТ).

Об'єктом дослідження є вимірювання широкосмугових сигналів перехідного електричного поля та розгляд технології вимірювання електромагнітних імпульсів на основі методів високошвидкісної цифрової дискретизації з використанням FPGA.

Предметом дослідження – характеристики та властивості параметричних сенсорів вимірювання електромагнітних імпульсів на основі методів високошвидкісної цифрової дискретизації з використанням FPGA для бездротових сенсорних мереж.

Для досягнення поставленої мети у магістерській кваліфікаційній

роботі розв'язуються наступні задачі:

- провести аналіз бездротових сенсорів фізичних величин;
- розглянути принципи вимірювання широкосмугових сигналів перехідного електричного поля;
- розглянути технології вимірювання електромагнітних імпульсів на основі методів високошвидкісної цифрової дискретизації з використанням FPGA;
- дослідити та оптимізувати конструкцію схеми формування індукованої напруги електричної дипольної антени;
- розглянути методи спектрального аналізу експериментальних даних в середовищі Matlab.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей; положень теорії функції комплексної змінної; диференціального числення для створення математичної моделі та обробки сигналів.

Наукова новизна одержаних результатів:

Розглянуто принципи вимірювання широкосмугових сигналів перехідного електричного поля, а також розглянуто технології вимірювання електромагнітних імпульсів на основі методів високошвидкісної цифрової дискретизації з використанням FPGA.

Досліджено конструкцію мініатюрного датчика перехідного електричного поля на основі електрично малої монопольної антени та розробляються відповідні схеми надширокосмугового вимірювання.

Представлена технологія локальної високошвидкісної цифрової дискретизації на основі FPGA, що дозволяє цифрову дискретизацію вимірюваних аналогових сигналів. Щоб вирішити поточні недоліки датчиків перехідного електричного поля, такі як низька продуктивність на низьких частотах, вузька смуга пропускання, недостатня точність, великі розміри, нестабільні амплітудні коефіцієнти та низька системна інтеграція, використано новий технічний підхід, заснований на високошвидкісній цифровій дискретизації на FPGA та волоконно-оптичному зв'язку. Для розробки датчика зі стійкістю до електромагнітних перешкод використано передову високошвидкісну аналого-цифрову технологію для дискретизації аналогового сигналу та оптичні волокна для передачі цифрового сигналу. Такий підхід максимізує цілісність сигналу, одночасно досягаючи стійкості до електромагнітних перешкод, і ефективно покращує чутливість та стабільність коефіцієнта датчика.

Базуючись на принципі роботи стрижневої електрично малої антени, досліджено та оптимізовано конструкцію схеми формування індукованої напруги електричної дипольної антени, розширивши аналогову смугу пропускання датчика з початкових 1 кГц до 460 МГц до надширокої смуги пропускання від постійного струму до понад 1,6 ГГц.

Практичне значення одержаних результатів:

Представлено методику калібрування системи вимірювання перехідного електричного поля в часовій області. Проведені експериментальні дослідження. Порівняльний аналіз роботи різних антенних датчиків показав, що розроблений датчик перевершує датчики D-dot та традиційні монопольні антенні датчики в низькочастотних сценаріях. Запропонований датчик успішно захопив форму хвилі зв'язаного електричного поля на частоті промислової частоти (50 Гц), причому її форма хвилі відповідає періоду напруги промислової частоти, відповідно до теорії квазіелектростатичної поля. Для порівняння, антена D-dot не змогла виявити цей низькочастотний сигнал через шумові перешкоди, тоді як форма хвилі традиційного датчика демонструвала значні спотворення.

Проведені дослідження демонструють, що можливості вимірювання електричного поля датчика охоплюють діапазон від стаціонарних сигналів промислової частоти до сигналів частотно-перехідного перенапруги (VFTO) та високочастотних перехідних сигналів, таких як часткові розряди. Ця вимірювальна система демонструє великий потенціал у сферах моніторингу стану, виявлення несправностей та діагностики, а також у локалізації несправностей, спричинених частковими розрядами, в енергетичному обладнанні.

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

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

1 БЕЗДРОТОВІ ПРИСТРОЇ МОНІТОРИНГУ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ

З постійним розвитком науки і техніки пасивні бездротові датчики відіграють вирішальну роль у численних застосуваннях і привертають увагу дослідників з різних галузей. Вимоги до використання датчиків також зростають, такі як коефіцієнт якості, чутливість і простір використання датчика. Інновації в чутливих матеріалах, таких як напівпровідники та полімерні матеріали, стимулюватимуть розвиток датчиків. Ці датчики використовуються для вимірювання таких параметрів, як тиск, вологість, деформація, температура та значення рН. Завдяки своїм унікальним характеристикам бездротові датчики можна використовувати для моніторингу місць, до яких важко отримати безпосередній доступ, таким чином відіграючи значну роль у повсякденному житті. Працюючи на низьких частотах, зазвичай у діапазоні десятків мегагерц, і використовуючи технологію зв'язку ближнього поля, вони дозволяють передавати дані на короткі відстані та енергію в складних умовах без необхідності активного обладнання, такого як батареї. Вони прості в експлуатації, мають низькі витрати на обслуговування та є екологічно чистими.

Крім того, з точки зору зчитування параметрів існують обмеження, такі як великі похибки зчитування даних, обмежені відстані зчитування, а також незручності та обмежена доступність мережевих аналізаторів у фактичному використанні пасивних бездротових сенсорних систем. Під час проектування автоматичних та портативних систем узгодження імпедансу необхідно запропонувати ефективні рішення для підвищення зручності використання пасивних бездротових датчиків, такі як збільшення відстані зчитування та підвищення точності зчитування. Що стосується передачі даних, оскільки пасивні бездротові датчики часто покладаються на низькоенергетичні стратегії зв'язку для передачі, вони часто призводять до таких проблем, як низька швидкість передачі та обмежена дальність передачі. Тому також є проблемою підвищення ефективності передачі при дотриманні енергоспоживання датчиків. Щодо збору енергії, існують різні методи збору енергії навколишнього середовища з радіохвиль. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на дослідженні топологій бездротових сенсорних мереж та розробці нових алгоритмів для зменшення втрат енергії та мінімізації вимог до нано-пристроїв збору. Наразі ефективність рекуперації енергії під час процесу збору все ще не висока. Крім того, бездротові датчики чутливі до перешкод від навколишнього середовища, такого як метал та рідина, а ефективність збору в середовищах з низькою щільністю потужності радіочастот та низькочастотним магнітним

полем є відносно складною для задоволення енергетичних потреб. Подальше дослідження застосування бездротових датчиків у повсякденному житті та розширення їх використання для зручнішого обслуговування населення є важливою сферою для майбутнього розвитку. Такі датчики часто використовуються в середовищах, що потребують тривалої роботи, тому вони також стикаються з такими проблемами, як ослаблення енергії та старіння обладнання. При тривалому використанні ефективність датчика може знизитися, явище дрейфу стане серйозним, і зрештою він не зможе працювати. Тому також терміново досліджувати нові матеріали та досліджувати нові виробничі технології.

1.1 Бездротові сенсорні пристрої для збору енергії з автономним живленням

Збір енергії – це метод перетворення навколишніх джерел енергії в електрику. До поширених джерел енергії належать сонячна, кінетична, електромагнітна, теплова, радіочастотні сигнали, мікрохвилі та навколишні магнітні поля. З розвитком науки та штучного інтелекту, розробка інтелектуальних малих пристроїв та їх інтеграція в нові програми Інтернету речей (IoT), такі як управління ланцюгами поставок та носимі обчислення, стає вирішальним фактором для задоволення потреб в енергії. Хоча малі пристрої споживають мінімальну енергію, використання батарей може призвести до значного забруднення навколишнього середовища, а використання генераторів може призвести до збільшення використання простору та зниження продуктивності пристроїв. Для вирішення цих проблем були впроваджені малі пристрої для збору енергії, які використовуються в бездротових датчиках. Бездротові датчики пропонують дві невід'ємні переваги. По-перше, вони усувають потребу в батареях, що зменшує розмір і займану площу датчиків, розширюючи спектр застосувань та полегшуючи використання мініатюрних пристроїв. По-друге, термін служби бездротових датчиків не обмежується ємністю батареї, а залежить від матеріалів самого датчика, що призводить до значного подовження терміну служби.

Однак ефективне використання збору енергії бездротових датчиків має свої власні проблеми. Кількість доступної енергії залежить від використовуваного алгоритму збору енергії та наноматеріалів, що використовуються для завантаження енергії, наприклад, гнучких колекторів енергії, що використовувалися в минулому. На рисунку 1.1 показано приготування наностержнів ZnO на гнучкій пластиковій підкладці з

використанням методу водного розчину. Цей метод виробництва простий в експлуатації, має низьку температуру росту, підходить для великомасштабного росту та масового виробництва, і тепер еволюціонував від ранніх досліджень п'єзоелектричного виходу наностержнів ZnO з однією деформацією до інновацій у масивах наностержнів, гнучких підкладках, альтернативних матеріалах та різних наноструктурах [1, 2].

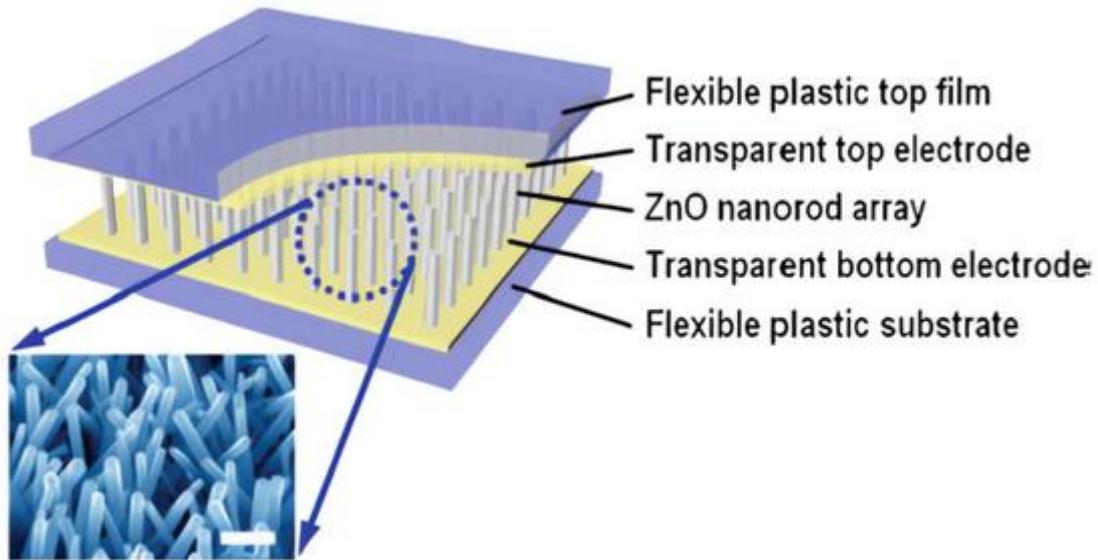


Рисунок 1.1 – Принципова схема гнучкого енергетичного комбайна на ранніх етапах використання

Цей розділ зосереджений на методах підвищення ефективності збору енергії та досягненнях у наноструктурованих генераторах, які поглинають різні джерела енергії. Також включені нові наноматеріали для TENG, PyENG, PiENG та корисні інновації для застосування в різних наногенераторах.

1.2 Алгоритми обробки інформативних сигналів

Ключем до збору енергії є не лише наноматеріали; нові алгоритми збору енергії можуть зменшити втрати енергії та підвищити ефективність перетворення. Марія Горлатова та Джон Сарік та ін. пропонують бездротовий вузол на основі Інтернету речей для збору кінетичної (рухової) енергії. Вони вирішують проблему розподілу енергії, впроваджуючи оптимальний автономний алгоритм, ефективну модель апроксимації та випадок оптимального онлайн-алгоритму. Отримана енергія розраховується за допомогою траєкторій, включаючи траєкторії прискорення, а аналіз та застосування цих траєкторій дозволяють розрахувати зібрану енергію. Зосереджуючись на впливі енергетичних характеристик на адаптивний

алгоритм збору, вони реалізують вузол безперервної дії, керований рухом, в рамках архітектури з наднизьким енергоспоживанням [3, 4].

Сенсорні мережі збору енергії (EHSN) відіграють вирішальну роль у довгостроковому, масштабному зборі даних і є необхідними для підтримки нових технологій, таких як великі дані та Інтернет речей. Однак випадковий та динамічний характер систем збору енергії створює значні проблеми з точки зору споживання енергії та її поповнення. Крім того, щоб уникнути конфліктів з користувачами стільникового зв'язку, датчикам часто потрібно призупиняти передачу сигналів та поступатися місцем іншим пристроям. У цьому контексті проблема планування ресурсів в EHSN стає особливо складною. Для вирішення цих проблем Дею Чжан та Чжиган Чен пропонують метод оптимізації ефективності, заснований на агрегованих мережах, спеціально розроблених для EHSN. Їхній підхід пропонує ефективний та зручний алгоритм онлайн-планування ресурсів, який ефективно фіксує та оптимізує невпорядкований збір та споживання енергії в системі. Метод використовує оптимізацію Ляпунова для розбиття проблеми на три керовані підкомпоненти: управління батареями, керування частотою дискретизації та конфігурацію швидкості передачі даних та каналу. Визначаючи оптимальний інтервал рішення та надаючи межі для оптимального рішення, цей метод забезпечує оптимальну ефективність мережі агрегації. Також враховуються гарантовані енергетичні та часові обмеження на вузлах, що дозволяє досягти оптимальної усередненої за часом корисності мережі агрегації [5].

Бездротові сенсорні мережі (БШМ) мають обмежені ресурси живлення та повинні працювати протягом тривалого періоду після розгортання. Для підвищення довговічності та стійкості вузлів БШМ вкрай важливо зменшити їх споживання енергії та підвищити ефективність збору енергії. Зі зниженням рівня енергії вузла також знижується точність та якість згенерованих даних датчиків. Для вирішення цієї проблеми використовується кілька поширених рішень, включаючи управління живленням зв'язку, регулювання напруги та струму, режими живлення, робочі цикли та об'єднання даних. Крім того, в БШМ зазвичай використовується адаптивне використання частоти для мінімізації споживання енергії.

Іншим підходом до зменшення споживання енергії є використання адаптивних методів дискретизації, де частота дискретизації динамічно регулюється на основі спостережуваних явищ. Узгоджуючи частоту дискретизації з виникненням подій, можна уникнути енергоємного процесу дискретизації в періоди низької активності. Однак, адаптивна дискретизація сама по собі лише продовжує життєвий цикл вузла, не забезпечуючи

довгострокової стійкості. Бруно Србіновскі та Мікеле Маньо пропонують адаптивний метод дискретизації, заснований на енергетичній чутливості, який застосовується до управління енергією. Цей алгоритм покращує можливості бездротових сенсорних вузлів, особливо тих, які оснащені можливостями збору енергії, що покладаються на зовнішні джерела для заряджання за часом. Метод забезпечує стійку роботу вузла навіть у сценаріях з високим споживанням енергії або коли зібраної енергії недостатньо для підтримки нормальної роботи. Коли зібрана енергія падає нижче порогу енергопостачання, будь-яка з адаптивних частот дискретизації може бути використана для підтримки нормальної роботи нижче порогу [6].

Підвищення енергоефективності має вирішальне значення для максимізації терміну служби бездротових сенсорних мереж (БСМ), що робить раціональне та ефективне використання потужності електропостачання ключовим фактором. Однією зі значних проблем у досягненні цієї мети є змінна в часі та просторі залежність від відновлюваних джерел енергії, що обмежує доступ до цих форм енергії. Рівень доступної енергії навколишнього середовища тісно пов'язаний з поточними умовами навколишнього середовища та демонструє значні коливання. Однак динамічний характер та доступність енергії навколишнього середовища створюють нові виклики.

Щоб вирішити цю проблему, С. Косунальп пропонує алгоритм прогнозування сонячної енергії під назвою QLSEP, який базується на q -навчанні. Цей алгоритм використовує попередні спостереження для прогнозування майбутніх метеорологічних умов, зосереджуючись на зміні інтенсивності сонячного світла під час збору сонячної енергії. Спираючись на цю можливість прогнозування, запроваджується нова стратегія енергозбереження. Вона спрямована на запобігання короточасному дефіциту енергопостачання, який виникає, коли доступна енергія падає нижче рівня, необхідного для передачі критичної інформації. Надаючи своєчасні та детальні прогнози майбутньої енергетичної ситуації на заданий період, цей підхід пропонує нову перспективу та може значно підвищити продуктивність бездротових сенсорних мереж [7].

Дійсно, досягнення високої енергоефективності в бездротових сенсорних мережах (БСМ) включає більше, ніж просто алгоритми. Карчана Кумарі запропонував новий підхід, використовуючи новий тип консольної балки, яка має покращену механічну міцність та сенсорні характеристики. Ця консольна балка піддається певній величині деформації, а вихідна напруга п'єзоелектричного перетворювача залежить від її структури. Для оптимізації продуктивності звичайної консольної балки Кумарі застосовує метод

оптимізації Крілла-Херда. Цей метод оптимізації зосереджений на регулюванні як положення кінця балки, так і частоти її коливань. Використовуючи метод оптимізації Крілла-Херда, форма та геометрія консольної структури в системі оптимізуються для підвищення ефективності збору енергії [8]. Поєднуючи інноваційний дизайн матеріалів та методи структурної оптимізації, робота Кумарі пропонує перспективний підхід до підвищення ефективності збору енергії в БСМ.

1.3 Високопродуктивні гнучкі п'єзоелектричні збирачі енергії на пластикових підкладках

У 2016 році Геон-Те Хванг, Венкатесварлу Аннапуредді та їхні колеги запропонували новий підхід до розробки високопродуктивних гнучких п'єзоелектричних збирачів енергії на пластикових підкладках. Вони використали метод аерозольного осадження (AD) для створення п'єзоелектричних плівок з цирконату титанату свинцю (PZT) для завершення збору енергії, прагнучи забезпечити автономне живлення бездротових сенсорних вузлових систем. Дослідники підготували кристалічні плівки AD-PZT товщиною 7 мкм на жорсткій сапфіровій підкладці та піддали їх високотемпературному відпалу при 900 °C. Згодом вони успішно перенесли ці плівки на еластичну підкладку за допомогою методу лазерного зняття на неорганічній основі (IRLO), гарантуючи, що структурна цілісність та продуктивність плівок не будуть порушені. П'єзоелектричний пристрій для збору енергії, розроблений у цьому дослідженні, пройшов експериментальні випробування, які показали, що він може генерувати напругу холостого ходу до 200 В та струми короткого замикання 35 мкА за допомогою механічного руху [9]. Це дослідження демонструє потенціал високопродуктивних гнучких п'єзоелектричних збирачів енергії для живлення бездротових сенсорних вузлів, пропонуючи можливості для самозабезпечення та подовження терміну служби.

Механічну енергію, що генерується коливаннями, можна зібрати за допомогою п'єзоелектричного пристрою або за допомогою електромагнітного колектора. Вони можуть зібрати достатньо енергії для більшості застосувань, але це не маленькі пристрої, а коливання високі, і вони не гарантують сталості, що неможливо під час руху велосипеда. Лука Букколіні та ін. розробили пристрій для збору електромагнітної енергії. Цей пристрій для збору енергії складається з котушки, яка поглинає енергію обертання колеса та виявляє обертання колеса. Цієї енергії достатньо для передачі даних про швидкість велосипеда до сусіднього пристрою за допомогою малопотужного

радіочастотного протоколу. Енергію колектора було протестовано [10]. Як відомо, вуглецеві нанотрубки мають велику площу поверхні відносно свого об'єму і тому схильні до зовнішніх збурень. На основі цього принципу Х'елінн Сонг та ін. розробили тонкий наногенератор з вуглецевих нанотрубок без будь-якого потоку рідини чи газу (як на рисунку 1.2), використовуючи більш інтуїтивну кулонівську гравітацію для перетягування носіїв заряду для генерації різниці напруг замість звичайної напруги, індукованої струмом [11].

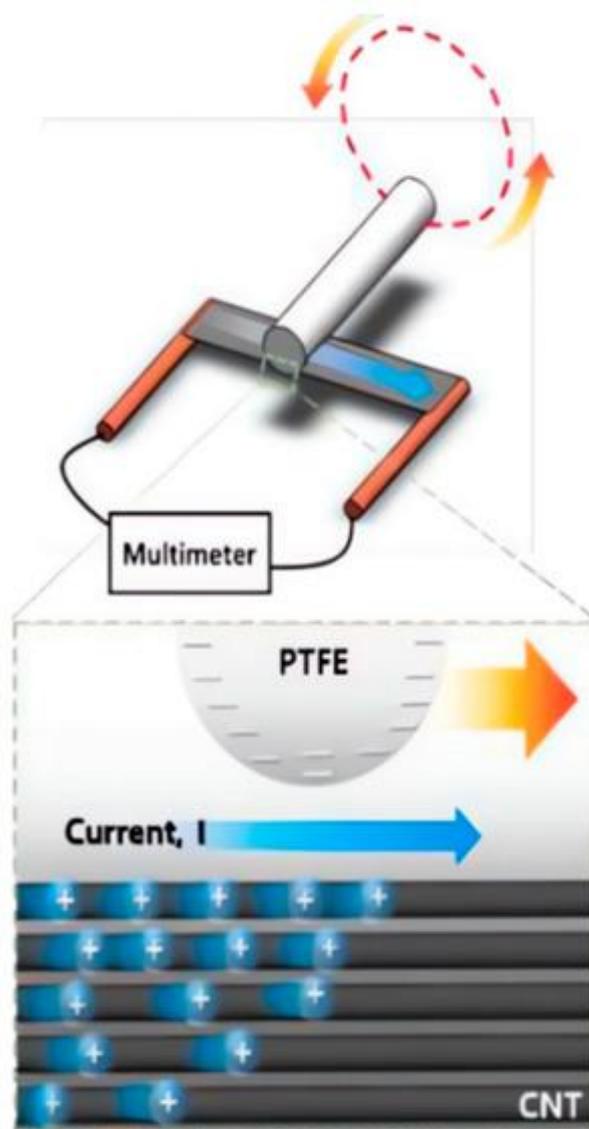


Рисунок 1.2 – Структура та принцип роботи наногенератора

1.4 Модулі гнучких термоелектричних генераторів (f-TEG)

У 2017 році Сун Джін Кім, Хьондо Чой та Йонгджун Кім зосередилися на вирішенні проблеми обмеженої щільності вихідної потужності модулів гнучких термоелектричних генераторів (f-TEG) через низький коефіцієнт добротності

(ZT) термоелектричних плівок, нанесених методом трафаретного друку. Щоб підвищити значення ZT, вони застосували процес інженерії дефектів іонізації та успішно досягли максимального ZT, використовуючи товсті плівки BiTeSe N-типу для трафаретного друку. Вони розробили новий пристрій f-TEG, використовуючи постіонізаційну інженерію дефектів (PID), щоб ще більше збільшити ZT друкованого термоелектричного матеріалу та покращити вихідні характеристики модуля f-TEG. Пристрій збору енергії показано на рисунку 1.3. Це дослідження забезпечує основу для створення модулів f-TEG з вищою продуктивністю та відкриває можливості для більш ефективного збору термоелектричної енергії [13].

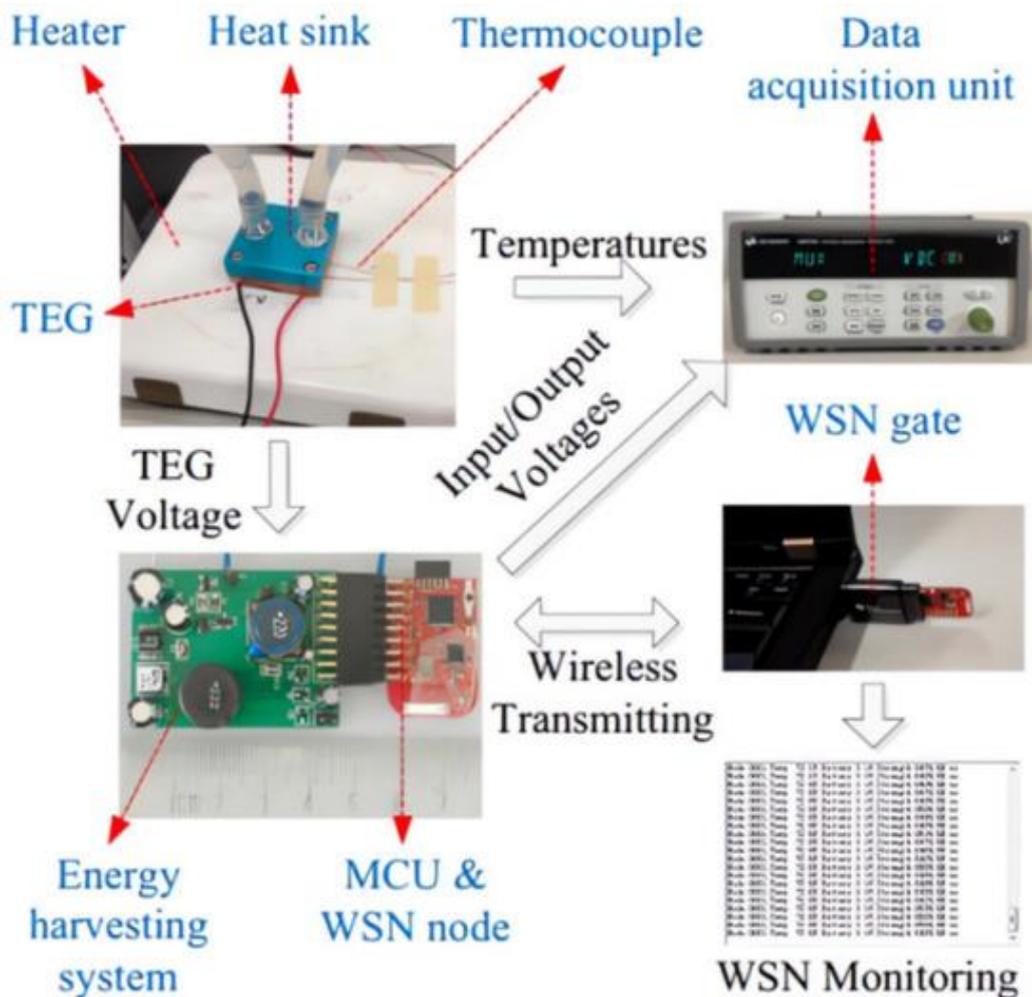


Рисунок 1.3 – Прототип системи збору енергії та експериментальна установка

Тепло тіла вже давно визнано життєздатним джерелом енергії для сталого функціонування. F-TEG пропонує спосіб збору цього тепла тіла. Однак традиційні неорганічні термоелектричні матеріали погано підходять для адаптації до шкіри людини через свою жорсткість. Щоб усунути це обмеження, тривають дослідження f-TEG, щоб зробити їх більш сумісними зі шкірою

людини. Хоча більшість f-TEG для збору тепла тіла спираються на неорганічні матеріали, було зроблено значний внесок у галузі термоелектричних абсорбційних систем для захоплення тепла, що генерується фізичним рухом тварин. Сміта Анканахаллі Шанкареговда та ін. опублікували власну роботу на цю тему, висвітлюючи використання простого електрода з графітово-покритого паперу (GCP) як ефективного та високоякісного джерела енергії для переробки відпрацьованої енергії. Експериментальні дані показують, що гнучкий та гідрофобний GCP може ефективно поглинати відпрацьовану енергію та живити бездротові датчики [14].

Окрім GCP, PVDF демонструє сильний п'єзоелектричний ефект. Піроелектричний ефект цього полімерного матеріалу привернув значний інтерес серед вчених. Зокрема, PVDF можна економічно ефективно виготовляти у тонкі плівки, і він має чудову хімічну стійкість до високих електричних пробійних полів. Марко та ін. досліджували матеріали для прозорих електродів (TE) на основі розчинів, такі як срібні нанодропи (AgNW) та полі(3,4-вінілендіокситіофен) полістиролсульфонат (PEDOT:PSS), для п'єзоелектричних та термоелектричних прозорих електродів у конструкції бездротових сенсорів PVDF. Вони порівняли результати з комерційно доступними електродами з алюмінієвого сплаву на полімерних підкладках та підкреслили переваги цих матеріалів. Взаємодія між п'єзоелектрикою та термоелектрикою є перспективною для керування вузлами бездротових сенсорів [15].

М. Гуань та ін. провели дослідження корисної моделі, пов'язаної із системою збору та управління енергією на основі різниці температур низької напруги з використанням самозапуску бездротової сенсорної мережі (WSN). Система здатна отримувати потужність від кількох десятків мікровоат до кількох міліват від низьковольтного термоелектричного генератора, як показано на рисунку 1.4. У своєму дослідженні вони запропонували новий підвищувальний перетворювач, заснований на методі відстеження максимальної напруги холостого ходу, з використанням біполярного режиму підсилення. Експериментальний аналіз підтвердив придатність цієї системи для робочих середовищ з низькою входною напругою та низькою потужністю, продемонструвавши її потенціал для практичного застосування [16].

У 2018 році Кім Йон Джун та Чун Сун Кім прагнули вирішити проблему обмеження сенсорних вузлів, які зазвичай дозволяють працювати лише одному датчику, що створює проблеми в промисловому середовищі, де потрібно кілька датчиків. Щоб вирішити цю проблему, вони розробили f-TEG великої площі, який можна обмотати навколо теплових труб різного діаметра, як показано

на рисунку 1.4. Це вдосконалення конструкції підвищує зручність використання та масштабованість f-TEG для сенсорних мереж. Основною метою їхнього рішення була оптимізація f-TEG спеціально для сенсорних мереж. Розроблений f-TEG розміром $140 \times 113 \text{ мм}^2$ досяг вихідної енергії 272 мВт при температурі $70 \text{ }^\circ\text{C}$ від теплової труби. Використовуючи зв'язок LoRa, система дозволила дистанційно контролювати температуру теплової труби, температуру навколишнього середовища, вологість, концентрацію CO_2 та концентрацію летких органічних сполук. Крім того, вони розробили мережу бездротового зв'язку сенсорної мережі (WSN), яка дозволяла бездротову передачу даних на відстань 500 м [17]. Цей прогрес у технології f-TEG пропонує потенційні переваги в промисловому середовищі, забезпечуючи масштабоване та універсальне рішення для живлення кількох датчиків і забезпечення дистанційного моніторингу через бездротовий зв'язок.

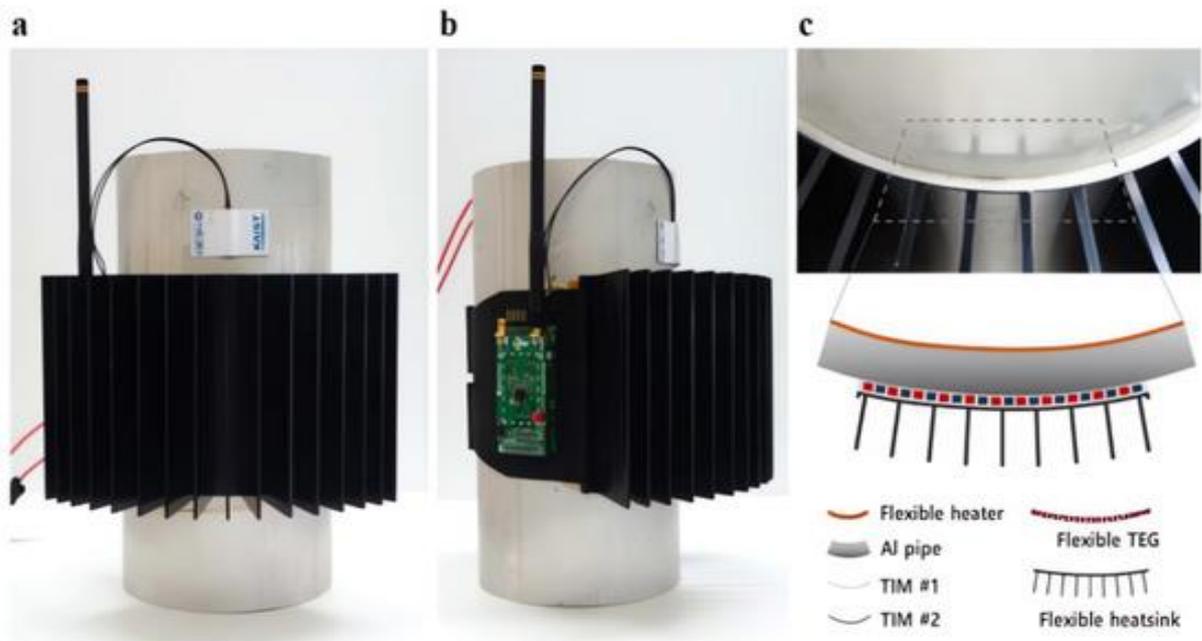


Рисунок 1.4 – (а) Вид спереду, (б) збоку та (с) зверху автономного бездротового сенсорного датчика (WSN), що керується f-TEG. Схема поперечного перерізу комбінованої теплової трубки/f-TEG/радіатора показана нижче

Існує кілька поширених джерел енергії навколишнього середовища, включаючи припливну, теплову, сонячну та вітрову енергію. Аднант Джуші та ін. запропонували використовувати збирання енергії вітру для пасивних бездротових сенсорних систем. Їхній підхід включає прогнозування погодних умов для передбачення доступності енергії вітру та використання різних стратегій управління енергією для ефективного використання енергії вітру [18].

У 2019 році Парк Х. та ін. представили застосування термоелектрики як сталого джерела живлення для Інтернету речей, включаючи бездротові сенсорні

мережі. Вони розглянули проблему підвищення низької вихідної напруги термоелектричних систем до більш зручних рівнів шляхом інтеграції управління живленням за допомогою перетворювачів напруги постійного струму. Крім того, вони запропонували вдосконалення термоелектричних систем, пропонуючи використання термоелектричних генераторів з інтегрованими радіаторами, як показано на рисунку 1.5 [18].

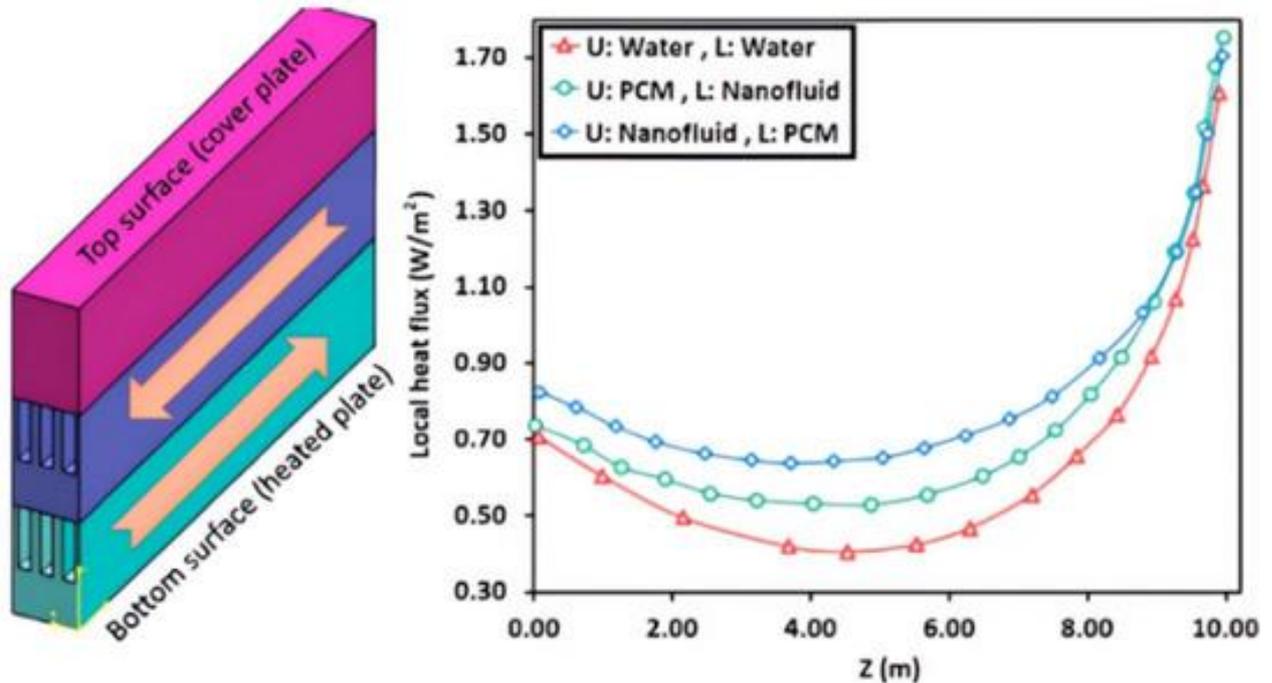


Рисунок 1.5 – Аналіз ребристого радіатора з PCM

1.5 Сенсори на базі високоякісного полімерного покриття на основі полівініліденфториду (PVDF)

У 2020 році Чаттерджі, Бхунія та ін. повідомили в журналі *Journal of Materials Chemistry*, що генератор тертя був побудований з пористим PVDF та бактеріальною целюлозою як субстратом. Їхнє дослідження мало на меті контролювати поверхневі та об'ємні властивості плівок PVDF за допомогою процесу лиття з розчину та дослідити взаємозв'язок між цими властивостями та відносною вологістю. Під час виготовлення плівок PVDF використовувалися різні умови вологості, які згодом були незалежно протестовані для визначення оптимальних умов для виробництва плівки. Щоб зменшити залежність від широко використовуваного, але токсичного розчинника диметилформаміду (ДМФ), ацетон використовувався як основний розчинник у підготовці плівки PVDF. Такий підхід не тільки мінімізував небезпеку для навколишнього середовища, але й забезпечив засоби для налаштування властивостей плівок PVDF, тим самим підвищуючи продуктивність пристроїв TENG. Автори також

демонструють застосування розробленого датчика з автономним живленням на основі наногенератора тертя в дистанційній безпеці. На рисунку 1.6 кожен, хто наступає на пристрій TENG, генерує змінний сигнал, розмір якого визначається прикладеним навантаженням. Отриманий сигнал потім перетворюється на вихідний сигнал постійного струму за допомогою мостового випрямляча, і результати демонструють високу ефективність цього наногенератора, що ще більше підкреслює його потенціал у різних застосуваннях [19].

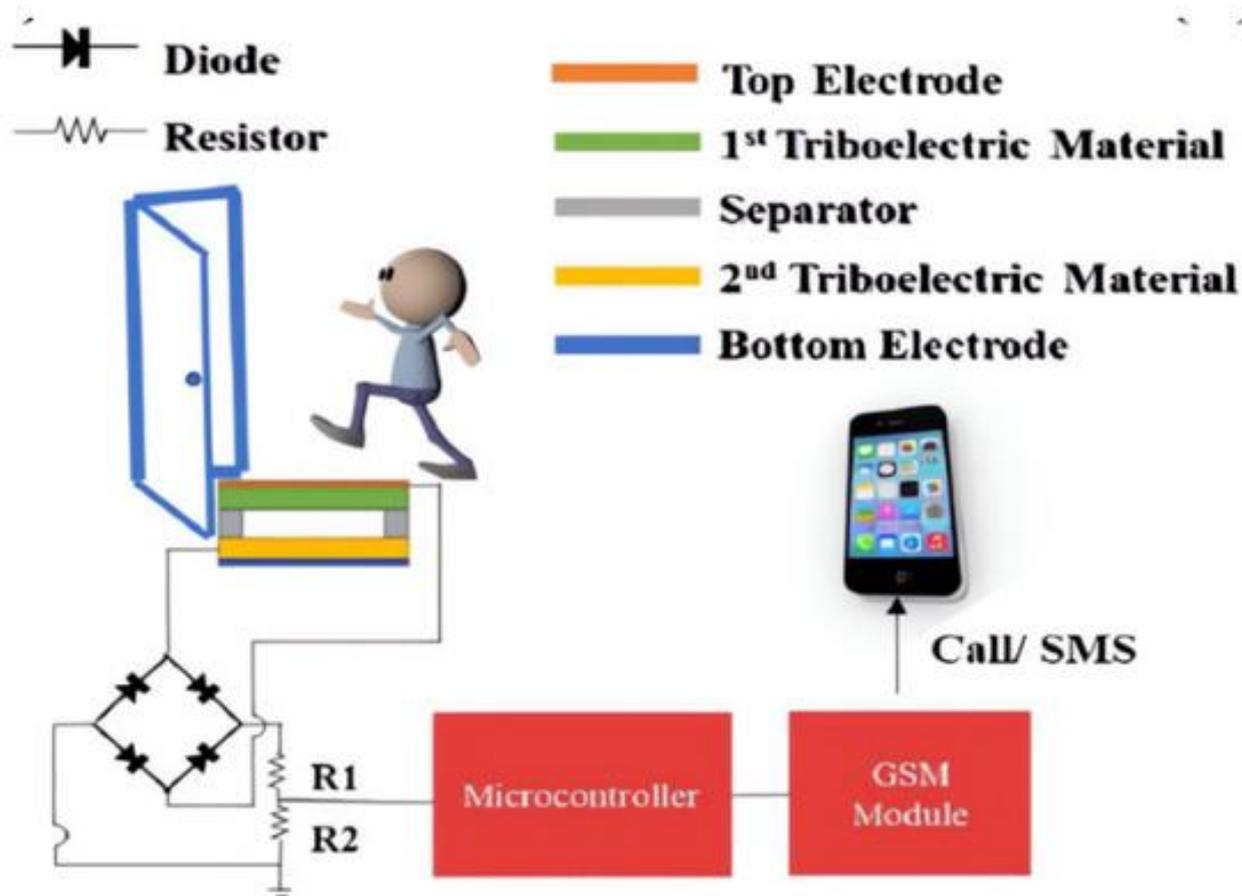


Рисунок 1.6 – Схема розташування датчиків із автономним живленням

У 2022 році Алаелдін М. та ін. представили новий підхід до вирішення проблеми безпечного виявлення пасивних бездротових датчиків у залізничному електропостачанні. Їхня пропозиція передбачала впровадження гібридної мультимодальної системи збору відновлюваної енергії для підтримки роботи бездротових датчиків моніторингу, включаючи акселерометри, датчики вологості, датчики нахилу та датчики освітленості, у віддалених районах вздовж залізниць. Для досягнення цієї мети вони розробили гібридну сонячну фотоелектричну систему, яка об'єднала вітрову турбіну, надруковану на 3D-принтері, та електромагнітний генератор. Ця система ефективно

використовувала як сонячну, так і вітрову енергію, яка потім накопичувалася в конденсаторі для зручного використання [20].

Загальні наноенергетичні збирачі зазвичай потребують тривалого періоду перед експлуатацією, щоб накопичити достатньо енергії для живлення датчиків та електронних пристроїв протягом короткого часу. Це створює труднощі для досягнення передачі сигналу в режимі реального часу, особливо в критичних сценаріях, таких як моніторинг надзвичайних ситуацій та аварій на предмет пошкодження мостів або повеней. У 2021 році Лянцюань Сюй та Цзінькай Чен запропонували повністю автономну бездротову сенсорну систему перехідних процесів на основі TENG. Ця система не залежить від електроніки чи мікросхем, а використовує котушки та ємнісні пасивні компоненти. Наразі дослідження бездротових сенсорних мереж (WSN) на основі самокерування в основному зосереджені на безпосередньому перетворенні сприйнятої енергії в сигнали, тому немає потреби в зборі, зберіганні та постачанні енергії. Коли фрикційний наногенератор піддається механічній вібрації, вітру та іншим зовнішнім силам, він буде з'єднаний з резонансною петлею, генеруючи імпульс напруги. Це створює вібраційний сигнал, що містить індуктивне повідомлення, яке може бути передано бездротовим способом до віддаленого приймача для індукції. Це створює коливальний сигнал, що містить сенсорну інформацію, яку можна передати бездротовим способом до віддаленого приймача для цілей зондування. Для збільшення амплітуди сигналу та відстані передачі система TENG містить мікроперемикачі, які значно збільшують амплітуду вихідної напруги TENG [21].

Ченгмей Цзян та ін. розглянули сучасні проблеми збору та передачі енергії для забезпечення бездротової передачі сенсорних пристроїв через енергопостачання. Вони виділили тенденції розвитку бездротових технологій для збору та передачі енергії навколишнього середовища, як показано на рисунку 1.7. У цій статті аналізуються різні джерела енергії, що використовуються в бездротовій системі збору енергії навколишнього середовища. На цій основі досліджуються різні механізми збору та режими бездротової передачі в системах збору та бездротової передачі енергії [21]. Автори також пропонують знайти ефективний метод створення невеликого та легко інтегрованого пристрою живлення сенсорного вузла з високою ефективністю збору, високою щільністю потужності, широкою пропускну здатністю та просторовим покриттям, а також легким встановленням та обслуговуванням.

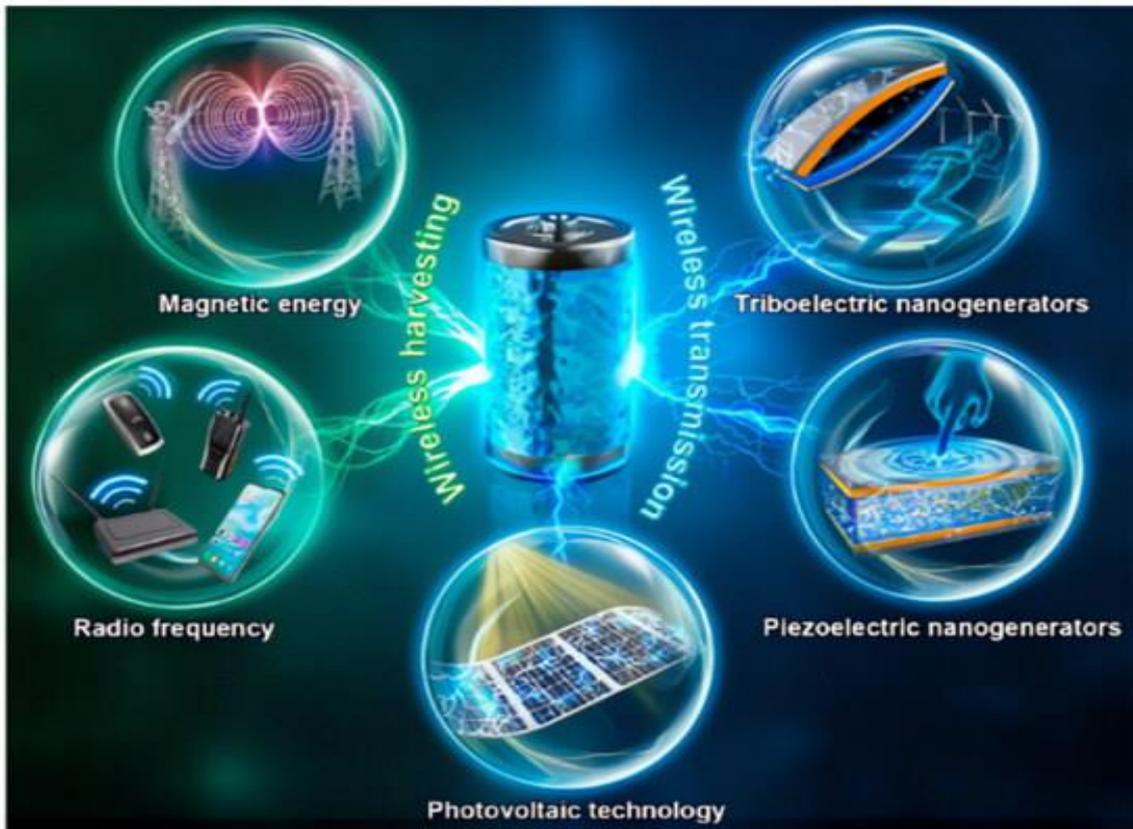


Рисунок 1.7 – Розробка бездротових технологій для збору або передачі енергії навколишнього середовища

Сучасні проблеми, пов'язані зі збором енергії, мають такі фактори. По-перше, випадковість є найбільшим обмежувальним фактором для зовнішньої енергії. Коли зовнішнє джерело енергії змінюється, це неминуче впливає на датчик. Наприклад, коли зовнішня різниця температур не може досягти мінімальної встановленої різниці температур термоелектричних наноматеріалів, термоелектричний ефект не може бути реалізований. Коли зовнішня механічна енергія не може бути гарантована, п'єзоелектричні матеріали не можуть поглинати енергію. По-друге, ефективність заміщення енергії також є основним обмежувальним фактором для бездротових пасивних датчиків. Хоча датчик має низьке енергоспоживання, він постійно втрачатиме енергію під час передачі та не зможе підтримувати стабільну роботу бездротового датчика, якщо ефективність перетворення не гарантована. Крім того, коли такі датчики застосовуються в реальному житті, необхідно враховувати також розмір, наприклад, у виявленні імплантованих захворювань людини та виявленні структур, коли занадто великий об'єм не допускається. Отже, розмір також є обмежувальним фактором. Нарешті, існує вимога до швидкості збору енергії, оскільки в багатьох випадках пристрій накопичення енергії не має робочого простору, тому йому потрібно безпосередньо постачати

енергію. У цей час існують вищі вимоги до швидкості поглинання енергії. Найважливішим питанням є те, як зменшити вплив цих обмежень на наші майбутні застосування. Мініатюрні наногенератори стали невід'ємними компонентами пасивних бездротових датчиків (як зазначено в таблиці 1.1), пропонуючи новий та екологічно вигідний метод виробництва електроенергії. Наногенерація, як технологія, має кілька переваг, включаючи спрощені процеси завантаження та розвантаження енергії. Зі постійним розвитком мікропристроїв, розширення нанотехнологій, особливо в бездротовому зондуванні, є неминучим і має багатообіцяючі перспективи застосування. У таблиці 1.2 наведено вичерпний огляд трьох основних типів наногенераторів та висвітлено відмінності між різними використовуваними джерелами енергії.

Таблиця 1.1 - Короткий опис кожного типу наногенератора

Type	Advantages	Disadvantages	Applications
PEENG	High energy collection, high sensitivity, low frequency operating range	Piezoelectric materials are often toxic Fragile	Powering wireless sensor arrays
PyENG	Easy to implement collection environment	Low power collection	Wireless charging for phones, powered by sensor arrays
TENG	Self-starting without external force	Difficult to maintain the tightness of the friction material	Powering LEDs, small microcontrollers

Таблиця 1.2 - Зведена інформація про різниці в енергії

Type	Advantages	Disadvantages	Applications
Light Energy	Large energy supply	Higher costs	Wearable wireless monitoring system
Mechanical energy	Cleaning	High environmental requirements	Passive wireless SAW pressure sensors
Thermal Energy	Convenient collection conditions	Low efficiency	Wireless charging for phones
Chemical energy	Achieving controlled conditions	High degree of restricted use	Wireless Communication, Passive
Human Movement Energy	Convenient collection conditions	Collecting less energy	Wireless Biosensors Sound judgement

1.6 Застосування пасивних бездротових датчиків

За останні роки досягнуто значного прогресу в розробці виробничих процесів пасивних бездротових датчиків та постійних інноваціях. Ці досягнення призвели до нових проривів у пасивних бездротових сенсорних пристроях, що дозволило досягти точніших показників параметрів. Зростає акцент на перетворенні теоретичних концепцій на практичні застосування для кращого обслуговування населення. Помітними прикладами таких застосувань є випробування безпеки будівельних конструкцій, де пасивні бездротові датчики відіграють вирішальну роль у моніторингу та забезпеченні цілісності

конструкцій. Крім того, ці датчики використовуються для моніторингу здоров'я людини, сприяючи постійному виявленню та ранній ідентифікації проблем, пов'язаних зі здоров'ям. Крім того, датчики сприяють перевірці безпеки широко використовуваного обладнання, забезпечуючи ефективну та надійну роботу.

Прагнення подолати розрив між теорією та застосуванням мотивоване бажанням підвищити безпеку та добробут. Бездротові датчики мають потенціал передбачати загрози безпеці заздалегідь, що дозволяє оперативно вживати проактивних заходів. Забезпечуючи моніторинг та аналіз у режимі реального часу, ці датчики дозволяють окремим особам та організаціям своєчасно вживати захисних заходів. Інтеграція технології пасивних бездротових датчиків приносить значні переваги різним галузям, забезпечуючи безпечніші будівельні конструкції, покращений моніторинг охорони здоров'я та підвищену безпеку обладнання. Зосередження на практичному впровадженні відображає прагнення краще обслуговувати населення та задовольняти його потреби, що постійно змінюються. Загалом, досягнення в галузі пасивних бездротових сенсорних пристроїв та перетворення теоретичних знань на практичне застосування відіграють важливу роль у наданні відчутних переваг суспільству, сприянні безпеці та збагаченні життя людей.

Випробування на безпеку конструкцій

Промисловий прогрес значно покращив якість життя, що призвело до посилення уваги до безпеки. Як наслідок, продукти з високим рівнем безпеки стали кращим вибором. Бездротові датчики відіграють вирішальну роль у підвищенні безпеки, прогнозуючи потенційні небезпеки та забезпечуючи оперативне вжиття превентивних заходів.

Ерозія ґрунту створює значні ризики, такі як обвалення будинків та нещасні випадки, спричинені нестабільним ґрунтом уздовж доріг. У 2010 році Богдан Лі та Кеннет Дж. Ло запропонували конструкцію пасивного бездротового датчика для виявлення структури ґрунту. Ця конструкція включає штучні частинки ґрунту, інкапсульовані епоксидною смолою, для виявлення зміщень та визначення ймовірності розпушування ґрунту. Завдяки вбудовуванню цих частинок у ґрунт можна контролювати їх рух на межі ґрунт-структура, що дає уявлення про механіку та поведінку межі ґрунт-структура [23].

SHM життєво важливий для виявлення невеликих деформацій та тріщин у конструкціях. У 2016 році Чунхі Чо та ін. розробили пасивний бездротовий датчик для точного виявлення таких деформацій та тріщин. Цей датчик використовує фототранзисторний модульований антенний датчик через низьку чутливість звичайних RFID-антенних датчиків до деформації. Система виявляє

зміни резонансної частоти, що генеруються довжиною патч-антени. Крім того, використовується режим подвоєння частоти для розрізнення сигналів навколишнього розсіювання від сигналів розсіювання датчика, що дозволяє проводити точні вимірювання мікродеформації. Датчик демонструє чутливість до деформації приблизно в п'ять разів вищу, ніж у раніше розроблених RFID-антенних датчиків [24].

Інфраструктура має обмежений термін служби, тому регулярні перевірки технічного обслуговування стають необхідними. Традиційні візуальні огляди часто не виявляють проблем вчасно та вимагають кваліфікованого персоналу та значних витрат часу. Бездротові огляди датчиків пропонують зручне рішення цієї проблеми. У 2019 році Е. Мацунага та ін. розробили пасивний бездротовий датчик для ефективних дистанційних оглядів [25]. Зміна резонансної частоти датчика, спричинена зміною резонансної довжини, використовується для визначення того, чи ослаблений болт, і доцільність цього підходу була продемонстрована за допомогою експериментів.

Металеві конструкції схильні до окислення та корозії, що робить перевірку безпеки надзвичайно важливою. Однак деякі металеві конструкції важкодоступні для перевірки, наприклад, ті, що занурені в морську воду. У 2016 році Ранія Халіфе та ін. запропонували бездротовий пасивний датчик корозії, який використовує технологію RFID без стружок. Цей датчик дозволяє контролювати деградовану підводну інфраструктуру, розташовану в прибережних районах та занурених середовищах. Датчик може бути розгорнутий у зонах, занурених у морську воду або зони бризок. Змінюючи потенціал чутливого металу та виявляючи зміни за допомогою двох резонаторів, інтегрованих з антеною, можна ефективно виявляти корозію. Експериментальні результати підтверджують придатність цього методу для підводного моніторингу [26].

Щоб задовольнити потреби будівництва розумних міст, самохідні пристрої пропонують інноваційні підходи до моніторингу дорожнього руху в інтелектуальних містах. Це включає пожежну сигналізацію, моніторинг навколишнього середовища, виявлення тріщин у літаках, виявлення небезпечних хімічних речовин у зонах з високим трафіком, а також моніторинг навантаження, температури та тиску в шинах транспортних засобів. Хассан Аскарі та Ехсан Асаді запропонували гібридний електромагнітний генератор тертя, який може жити датчики моніторингу доріг, що полегшує моніторинг дорожнього руху. Цей гібридний підхід використовує переваги гібридної конструкції, пропонуючи нові ідеї для майбутньої розробки наногенераторів [27].

Для перевірки стану конструкцій, застосування в транспортних засобах є важливим. Як правило, виявлення стану транспортного засобу, яке ми використовуємо, оцінюється за пройденим маршрутом та циклом огляду, що, очевидно, має дуже низьку надійність [28]. Розробка пасивних бездротових датчиків може реалізувати виявлення транспортних засобів у режимі реального часу шляхом виявлення споживання заряду акумулятора транспортного засобу, пройденої відстані та інших параметрів, а також уникнути небезпек під час руху через пошкодження акумулятора [29].

1.7 Сенсори для тестування здоров'я людини

У сфері виявлення стану здоров'я людини бездротові датчики відіграють вирішальну роль у генеруванні електричних сигналів та зборі інформації для оцінки самопочуття людини. Моніторинг фізіологічних сигналів у режимі реального часу, таких як імплантація органів для лікування захворювань та інтеграція систем для дистанційного моніторингу, може значно зменшити медичний стрес та забезпечити людей даними про здоров'я в режимі реального часу.

Клінічне лікування травматичних ран досі значною мірою спирається на традиційні підходи 20-го століття. Оцінка травми рани в основному базується на візуальному спостереженні лікарів, що часто призводить до частоті зміни пов'язок. Однак надмірне використання змін пов'язок порушує процес загоєння та збільшує вартість лікування. Візуальний огляд, будучи суб'єктивним, не завжди може забезпечити точне уявлення про рану, що призводить до ризику непотрібної заміни. Точне виявлення невідповідних ран дозволить медичному персоналу проводити відповідне лікування, запобігаючи перетворенню важких ран на хронічні. Рахімі, Бренер та Очоа та ін. впровадили гнучкий датчик рН, підключений до RFID-транспондера з бездротовим модулем, який дозволяє бездротово зчитувати рН через смартфон з підтримкою NFC. Цей підхід полегшує візуальний огляд, а сенсорний електрод, виготовлений з використанням недорогої плівки ІТО, безпосередньо нанесеної лазером, пропонує практичність для реальних застосувань [30].

Окрім рН, механічне напруження та вміст вологи в тканинах шкіри суттєво впливають на швидкість та ефективність загоєння ран і вимагають моніторингу в режимі реального часу. Дослідження показали, що помірний тиск у рані сприяє утворенню та росту нових кровоносних судин, а підтримка балансу вологи сприяє росту та міграції, що є важливим для оптимального загоєння рани. Моніторинг тиску води та вологості навколо рани в режимі

реального часу має вирішальне значення для оцінки умов навколишнього середовища, що сприяють загоєнню ран та покращенню комфорту пацієнта. У 2018 році Ван Ліфенг та Хуан Цінгань розробили гнучкі пасивні бездротові датчики тиску та вологості, використовуючи вологочутливий конденсатор з оксидом графену (GO) як чутливим матеріалом та чутливий до тиску конденсатор з конічним PDMS як середовищем. Гнучка природа матеріалів датчиків підвищує їх придатність для лікування ран. Було досягнуто бездротового моніторингу механічного тиску та вологості в місці рани в режимі реального часу, а також прогнозування оптимального часу загоєння рани. Бездротовий датчик продемонстрував чутливість до вологості -61 кГц/% відносної вологості в діапазоні від 20% до 90% відносної вологості та чутливість до тиску $-388,6$ кГц/мм рт. ст. в діапазоні від 0 мм рт. ст. до 100 мм рт. ст. [31]. У 2021 році Садаф Чархабі та ін. запропонували бездротовий датчик для моніторингу загоєння ран. Датчик відстежує процес загоєння, забезпечуючи гігієнічну систему для рани, гарантуючи стерильне середовище. Датчик визначає конкретні параметри на основі впливу ступеня загоєння на діелектричну проникність та електропровідність тканини. Випробування структурного моделювання на желатині підтвердили ефективність датчика, що є новим проривом у моніторингу здоров'я людини [32]. Особливо у таких випадках, як пандемія COVID-19, коли багато медичних працівників не можуть особисто контролювати стан здоров'я пацієнтів, бездротові датчики пропонують значне полегшення цього стресу. Наппі, Міюцці та ін. запропонували пластир для шкіри людини, що використовує технологію радіочастотної ідентифікації для моніторингу різних параметрів шкіри, таких як температура, вологість тощо. Датчик був протестований з урахуванням ступеня пошкодження людського організму, і результати продемонстрували його здатність зчитувати дані на відстані до 80 см, тим самим покращуючи практику охорони здоров'я [33]. У 2022 році Ці Чжан та ін. використали гнучкі датчики, щоб забезпечити моніторинг здоров'я людини та визначення захворювань у режимі реального часу за допомогою пасивних бездротових датчиків. Датчики, виготовлені з магнітних гідрогелів Fe_3O_4 , демонструють чудові механічні властивості, що характеризуються надм'якістю, та мають потужну магнітну силу. Ці унікальні властивості дозволяють точніше контролювати рівні деформації, як показано на рисунку 1.8, що є значним прогресом у галузі імплантованих бездротових пасивних датчиків для застосування на людському тілі.

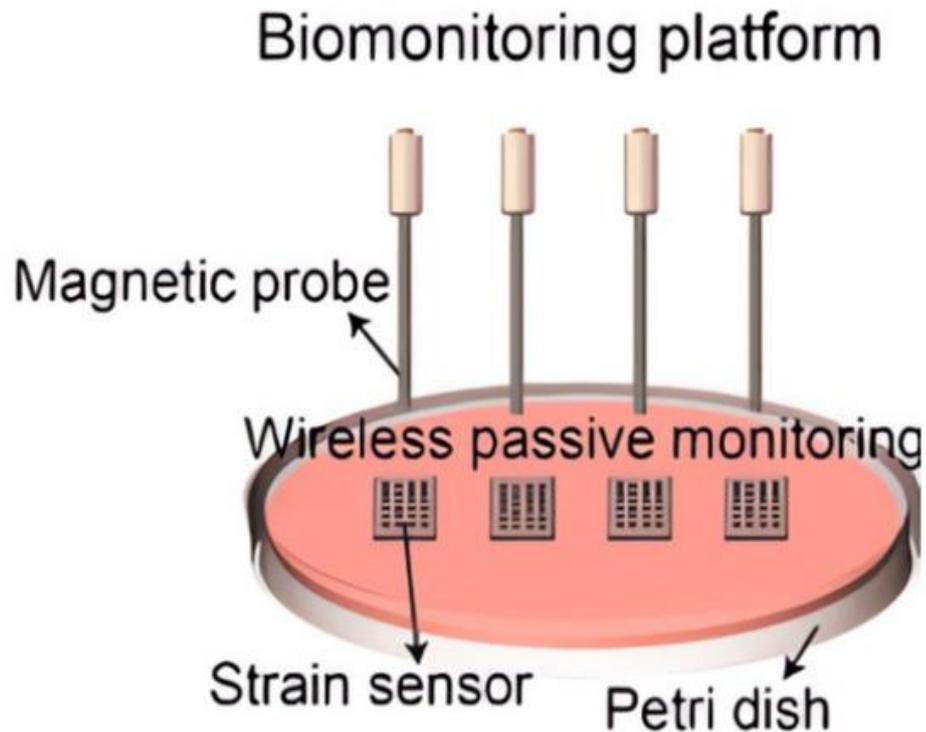


Рисунок 1.8 – Біодетектори за допомогою бездротових пасивних датчиків

Окрім моніторингу травматичних ран, бездротові датчики також відіграють значну роль у моніторингу різних інших станів здоров'я, зменшуючи кількість візитів до лікарень, знижуючи витрати та надаючи точну інформацію про здоров'я. Глаукома, друга провідна причина сліпоти у світі, щороку вражає велику кількість людей, призводячи до втрати зору. Це захворювання очей, пов'язане з високим внутрішньоочним тиском (ВОТ). Наразі пацієнти з глаукомою потребують ретельного моніторингу свого ВОТ, який лікується за допомогою хірургічних процедур та медикаментів. З покращенням рівня життя поширеність проблем із зором зростає. Моніторинг параметрів ВОТ може служити важливим показником здоров'я очей.

М. Хоссейн М. та ін. розробили пасивний бездротовий датчик, вбудований у контактну лінзу, для моніторингу внутрішньоочного тиску в режимі реального часу. Цей інноваційний підхід дозволяє безперервно контролювати зміни рогівки, що виникають внаслідок коливань внутрішньоочного тиску. Датчик в основному складається з постійного конденсатора та змінної індуктивності. Примітно, що форма індуктора являє собою замкнутий серпантин. Ця технологія пропонує значний прогрес у моніторингу та лікуванні глаукоми [34].

У галузі оцінки функціональності кісток Лімін Рен та його студент Кун Ю запропонували датчик моніторингу сили кісток на основі магнітопружності. Цей датчик має на меті вдосконалити неінвазивні методи оцінки

функціональності кісток та забезпечити своєчасний зворотний зв'язок для післяопераційного ведення. Використовуючи цей датчик, медичні працівники можуть контролювати сили кісток та відповідно оптимізувати догляд за пацієнтами [35].

Хвороба Паркінсона – це прогресуюче нейродегенеративне захворювання, що характеризується переважно тремором рук, ніг або тіла, а також низкою інших симптомів, включаючи брадикінезію (уповільнені рухи), ригідність, нерухомість обличчя, зменшення розмаху рук під час ходьби та труднощі з мовленням, такі як зниження гучності, монотонність та невиразність мови. Для ефективного моніторингу пацієнтів із хворобою Паркінсона Чон-нам Кім та ін. розробили датчик тремору з автономним живленням, використовуючи гідрогель діатомових водоростей на основі катехол-хітозану (CCDHG), високопластичний та іонно-провідний матеріал. CCDHG складається з природних морських біоматеріалів, які мають властивості самовідновлення та провідність навіть в умовах повторюваних високих напружень. Цей полімер демонструє чудову гнучкість, що дозволяє легко інтегруватися з гнучкими електронними компонентами. Аналізуючи CCDHG-TENG у частотній області, як показано на рисунку 1.9, можна оцінити тяжкість хвороби Паркінсона без необхідності використання комерційно доступних датчиків прискорення. Результати цього дослідницького проекту не тільки пропонують інноваційні ідеї для клінічного застосування, але й надають цінні технічні інструменти для допомоги в лікуванні хвороби Паркінсона.

Серцево-судинні захворювання стали найпоширенішим та найруйнівнішим станом у світі, спричинивши 12,3 мільйона смертей у 1990 році та зросли до 17,3 мільйона смертей у 2013 році. Широке дослідження показує, що довгостроковий моніторинг фізіологічних сигналів може передбачити приблизно 90% серцево-судинних захворювань. Щоб вирішити цю проблему, Хань Оуян та ін. розробили інноваційний та гнучкий імпульсний датчик на основі фрикційних електроактивних датчиків. Цей самокерований датчик має чудові характеристики, такі як висока чутливість, високе пікове співвідношення сигнал/шум та низька вартість. Система дозволяє здійснювати точний, бездротовий та моніторинг серцево-судинної системи в режимі реального часу за допомогою аналізу імпульсних сигналів. Аналіз включає профілювання пульсу, пангратограми ВСР та індекси ВСР за часом, а також ідентифікацію ішемічної хвороби серця, дефектів перегородки та фібриляції передсердь [36].

Теплову енергію, яка в достатній кількості присутня в різних природних та пов'язаних з людиною джерелах, таких як сонячна теплова енергія, вихлопні газы

автомобілів та дихання людини, можна ефективно використовувати. PyNG пропонують перспективне рішення для перетворення відпрацьованого тепла на корисну енергію. У зв'язку з цим Хао Сюе та їхня команда розробили носимні PyNG, інтегрувавши мембрану PVDF з маскою N95. Цей інноваційний пристрій фіксує тепло, що утворюється під час дихання людини, що дозволяє контролювати дихальні режими та температуру навколишнього середовища в режимі реального часу [37].

Розробка бездротових пасивних датчиків забезпечує зручність використання Інтернету речей [38]. З підвищенням соціальної обізнаності про здоров'я, фізичне та психічне здоров'я учнів стало предметом широкого занепокоєння. Але багато факторів визначають фізичне та психічне здоров'я, і наразі Інтернет речей та бездротові датчики стали перспективним та ефективним рішенням. Лі Хун-тан та ін. запропонували використовувати бездротові датчики для фіксації факторів зовнішнього середовища учнів та збору різних показників, які впливають на щастя учнів у повсякденному житті, таких як ІМТ тіла, результати іспитів учнів та частота щоденних фізичних вправ. Потім Інтернет речей використовується для збору даних, а різні алгоритми штучного інтелекту використовуються для оцінки фізичного та психічного здоров'я учнів. Це дозволило здійснити моніторинг та управління здоровим розвитком підлітків [39].

1.8 Сенсори для випробування безпеки

У нашому повсякденному житті забезпечення безпеки машин та обладнання має першорядне значення. Однак моніторинг цих пристроїв може створювати труднощі через суворі умови, в яких вони працюють. Саме тут бездротові датчики можуть виявитися безцінними.

У 2015 році Хуейсін Чжан та Інпін Хонг розробили набір пасивних систем вимірювання тиску, придатних для використання в умовах високих температур понад 800 °С. Система використовує рідкокристалічний резонансний датчик на керамічній основі, зчитувач фазового детектора імпедансу, ізолятор та композитну платформу для випробування температури та тиску, як показано на рисунку 1.9. Експериментальні результати показують, що лінійність датчика становить 0,93%, повторюваність – 6,6%, похибка гістерезису – 1,67%, а чутливість – 374 кГц/бар. Він може точно вимірювати температуру від кімнатної до 800 градусів Цельсія та тиск від 70 до 190 градусів Цельсія. Примітно, що можливості датчика роблять його придатним для вимірювання тиску всередині камери паливних транспортних засобів.

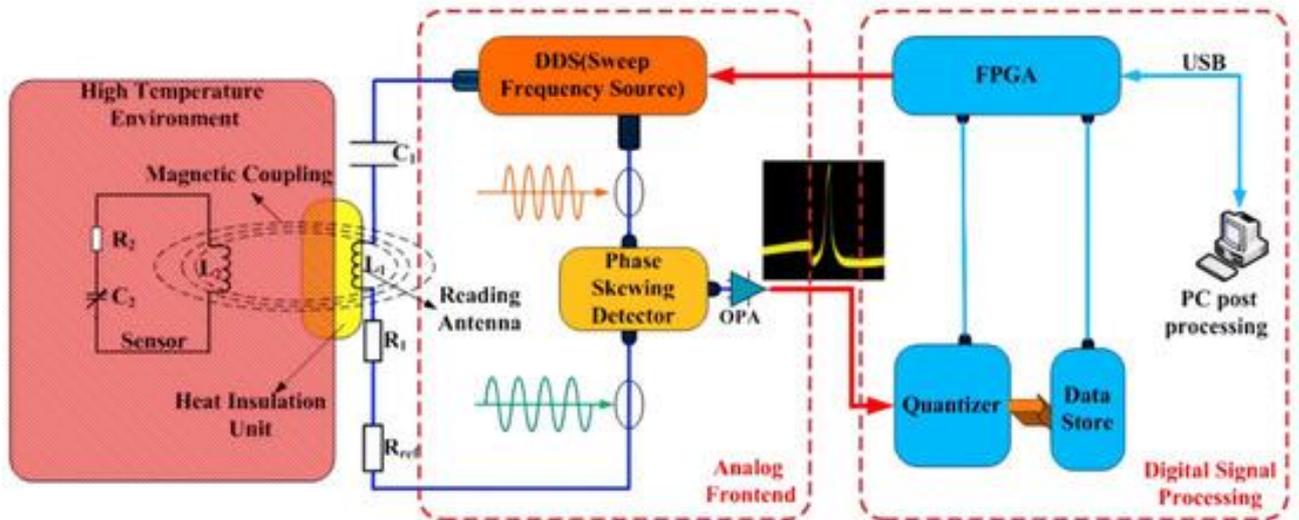


Рисунок 1.9 – Блок-схема бездротової вимірювальної системи

У 2020 році Чжу Цзяньхуа та ін. використали пасивні бездротові датчики для виявлення змін температури в трансформаторах, представивши новий підхід до бездротового вимірювання температури. Цей інноваційний бездротовий пристрій пропонує покращені заходи безпеки для трансформаторів, ефективно контролюючи та підтримуючи стабільні робочі температури [40].

У галузі буріння точне вимірювання швидкості та орієнтації буріння має вирішальне значення для регулювання процесу буріння. Чжоу та ін. розробили новий тип датчика, який дозволяє точно вимірювати швидкість та орієнтацію буріння з похибкою 4%, чутливістю 0,0167 Гц/об/хв та лінійністю 3,5%. Цей датчик з діапазоном 0–1000 об/хв допомагає уникнути затримок та економічних втрат, усуваючи необхідність піднімати бурове долото зі свердловини, коли датчик швидкості замінено або пошкоджено [40].

Ще одна варта уваги розробка належить Ліфенг Чжу, який створив датчик обертального руху з автономним живленням, здатний вимірювати кілька параметрів одночасно. Датчик містить електроди тертя, що складаються переважно з пластин у формі рейки та неповних шестерень, що покращують вихідний сигнал. Крім того, датчик демонструє стійкість до навколишнього шуму, що робить його придатним для промислового застосування в галузі обертального детектування [41].

У сфері датчиків з автономним живленням, Ді Ю та ін. створили PiENG на основі ($\text{BaTi} 0.88\text{Sn} 0.12\text{O}_3$) BTS, безсвинцевої п'єзоелектричної кераміки, легованої оловом BaTiO_3 (BTS). Ці гнучкі композитні плівки можуть зазнавати значних змін у відповідь на невеликі коливання сили. Цей датчик з автономним

живленням, що використовує композитну плівку BTS-GFF/PVDF, підходить для моніторингу руху людини та безпеки водіння на випадок втоми, що особливо важливо для вирішення глобальної проблеми дорожньо-транспортних пригод.

Для безпечної експлуатації залізничних систем Сюецзюнь Чжао та Го Ву пропонують фрикційний електро-нано-вібраційний датчик швидкості з самоприводними характеристиками. Цей датчик ефективно збирає та перетворює енергію низькочастотної вібрації та може служити самоприводним датчиком вібраційного прискорення. Ці результати дослідження закладають основу для застосування технології моніторингу стану залізничних конструкцій в обладнанні залізничних локомотивів та практичній експлуатації [42].

Моніторинг тиску в шинах має вирішальне значення для забезпечення безпеки та ефективного використання шин в автомобільній промисловості. Цзіньгуй Цянь та Дон-Су Кім розробили магнітно-прискорений датчик та магніто-фрикційний наногенератор, які можуть керувати бездротовим датчиком для передачі даних про тиск і температуру шин у режимі реального часу. Ця технологія знижує ризик виходу з ладу обладнання, спричиненого надмірними відцентровими силами, тертям та заклинюванням, тим самим підвищуючи безпеку та надійність систем моніторингу шин [43].

У галузі моніторингу землетрусів Лімін Рен пропонує магнітострикційний датчик із власним живленням, який використовує принцип індукції Фарадея. Датчик виявляє зміни магнітного потоку, спричинені варіаціями магнітної проникності, та генерує напругу на котушці, щоб попередити про майбутній землетрус. Ця технологія має практичне значення для захисту людського життя та майна, забезпечуючи ефективний моніторинг землетрусів.

1.9 Висновки до розділу

У даному розділі проведено аналіз бездротових сенсорів фізичних величин. Під час проектування автоматичних та портативних систем узгодження імпедансу необхідно запропонувати ефективні рішення для підвищення зручності використання пасивних бездротових датчиків, такі як збільшення відстані зчитування та підвищення точності зчитування. Що стосується передачі даних, оскільки пасивні бездротові датчики часто покладаються на низькоенергетичні стратегії зв'язку для передачі, вони часто призводять до таких проблем, як низька швидкість передачі та обмежена дальність передачі. Тому також є проблемою підвищення ефективності передачі при дотриманні

енергоспоживання датчиків. Щодо збору енергії, існують різні методи збору енергії навколишнього середовища з радіохвиль. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на дослідженні топологій бездротових сенсорних мереж та розробці нових алгоритмів для зменшення втрат енергії та мінімізації вимог до нано-пристроїв збору. Наразі ефективність рекуперації енергії під час процесу збору все ще не висока. Крім того, бездротові датчики чутливі до перешкод від навколишнього середовища, такого як метал та рідина, а ефективність збору в середовищах з низькою щільністю потужності радіочастот та низькочастотним магнітним полем є відносно складною для задоволення енергетичних потреб. Подальше дослідження застосування бездротових датчиків у повсякденному житті та розширення їх використання для зручнішого обслуговування населення є важливою сферою для майбутнього розвитку. Такі датчики часто використовуються в середовищах, що потребують тривалої роботи, тому вони також стикаються з такими проблемами, як ослаблення енергії та старіння обладнання. При тривалому використанні ефективність датчика може знизитися, явище дрейфу стане серйозним, і зрештою він не зможе працювати. Тому також терміново досліджувати нові матеріали та досліджувати нові виробничі технології.

2 БАГАТОКАНАЛЬНИЙ РАДІОТЕХНІЧНИЙ ПРИСТРІЙ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ

У складних електромагнітних середовищах, таких як підстанції, перетворювальні станції в енергетичних системах, а також відсіки літаків, поїздів та автомобілів, випробування на електромагнітну стійкість є надзвичайно важливим. Воно вимагає, щоб датчик електричного поля мав такі характеристики, як широкий динамічний діапазон вимірювання (амплітуда від сотень В/м до десятків кВ/м), висока швидкість відгуку (час відгуку порядку наносекунд або субнаносекунд), широка смуга пропускання (від постійного струму до 1 ГГц і вище), мініатюризація та стійкість до сильних електромагнітних перешкод. У даному розділі представлено багатоканальний надширокосмуговий пристрій вимірювання перехідного електричного поля.

Аналогова смуга пропускання системи охоплює спектр від постійного струму та частоти живлення 50 Гц до сигналів часткових розрядів, від постійного струму до 1,65 ГГц, з глибиною зберігання 2 Гб (з можливістю розширення). Він долає проблеми, пов'язані з нестабільністю, недостатньою смугою пропускання та неточністю оптичних волокон при передачі аналогових сигналів, використовуючи цифрову дискретизацію на передньому кінці на основі технології програмованих вентильних матриць (FPGA) та передаючи цифрові сигнали через оптичні волокна. Цей підхід ефективно застосовується для вимірювань у сильних електромагнітних середовищах. Крім того, система може одночасно отримувати доступ до чотирьох каналів сигналів із часом синхронізації, що досягає 300 пікосекунд, може бути підключена до датчиків напруги та струму одночасно, а передній датчик може бути гнучко замінений.

Продуктивність системи перевіряється за допомогою роботи вимикача та випробування в стаціонарному режимі на перетворювальній підстанції постійного струму високої напруги (HVDC). Вона ефективно застосовується в таких сценаріях, як онлайн-моніторинг перехідних електромагнітних середовищ у високовольтному силовому обладнанні, діагностика несправностей та точна локалізація джерел випромінювання, таких як часткові розряди або навмисні електромагнітні перешкоди (ІЕМІ).

2.1 Застосування пристроїв моніторингу електромагнітних перехідних процесів

Електромагнітні випромінювальні поля присутні під час таких процесів, як удари блискавки, перемикання високої напруги, накопичення статичної електрики та часткові розряди, спричинені пошкодженням ізоляції. Ці електромагнітні випромінювальні поля характеризуються високою інтенсивністю, швидкими змінами та широким частотним спектром, і вони можуть потрапляти в електронні системи через антени, отвори, кабелі та інші шляхи [44], потенційно спричиняючи тимчасове або постійне пошкодження різних електронних пристроїв і систем [45 - 47]. Вимірювання перехідних електромагнітних полів є вирішальним аспектом досліджень захисту від електромагнітних полів. Воно відіграє життєво важливу роль у вивченні характеристик поширення перехідних електромагнітних полів, розробці методів захисту та оцінці їхнього впливу.

Наразі існує два основні підходи до вимірювання перехідного електричного поля — перший базується на фотоелектричному ефекті, де сигнал електричного поля перетворюється на оптичний сигнал для вимірювання. Однак оптичні датчики електричного поля мають складні виробничі процеси, на них значно впливають зовнішні фактори навколишнього середовища, такі як температура, та обмежений динамічний діапазон, що обмежує їх широке застосування.

Інший підхід передбачає датчики електричного поля, засновані на принципі електромагнітної індукції. Такі датчики застосовувалися раніше в галузі вимірювання ЕМІ, і відповідна вимірювальна технологія є більш зрілою. Баум та інші систематично узагальнили технологію вимірювання ядерного ЕМІ [48]. У міру розвитку зусиль у галузі вимірювання ЕМІ, Міжнародна електротехнічна комісія послідовно сформулювала та опублікувала серію міжнародних стандартів, пов'язаних з вимірюваннями ЕМІ, включаючи вимірювання радіаційних перешкод, перешкод провідності, стійкості та параметрів перехідних процесів високої потужності [49]. Згодом компанія Montena Ltd. (Россенс, Швейцарія) комерціалізувала виробництво поступових конічних дипольних антен, параметри яких коригувалися відповідно до різних вимог до частоти, досягаючи верхньої граничної частоти 10 ГГц. У 2007 році Кошелєв та інші з Російського інституту сильнотрумової електроніки розробили двовимірну активну електричну дипольну антену для вимірювання надширокосмугових імпульсів з робочою смугою пропускання від 0,6 до 4,6 ГГц [50]. Баум та ін. запропонували диференціальний датчик електричного

поля, відомий як D-dot, для вимірювання сигналу електричного поля ЕМІ [42]. Вихідний сигнал напруги датчика пропорційний диференціалу електричного поля, що робить його придатним для вимірювання надшвидких імпульсних сигналів. Однак цей датчик вимагає інтегрування вихідного сигналу, що підходить для сценарію з низьким співвідношенням сигнал/шум та -частотою. У роботі [47] запропоновано надширокосмугову антену в часовій області, яка з'єднує енергію електричного поля через пару диференціальних диполів, з робочим діапазоном частот 10 МГц ~ 1 ГГц.

Для вимірювання перехідного електромагнітного середовища на підстанціях енергосистеми була розроблена система вимірювання перехідного електричного поля наносекундного рівня з діапазоном пропускну здатності від 1 кГц до 460 МГц. У посиланнях [16-21] досліджувалися частотні характеристики випромінюваних електромагнітних полів, що генеруються перемикальними підстанціями, та їх вплив на вторинне обладнання. Їхні результати показують, що амплітуда перехідних випромінюваних електромагнітних полів, що генеруються високовольтними перемикачами, коливається від сотень В/м до десятків кВ/м, зі спектральними складовими, що охоплюють від кількох сотень кГц до кількох сотень МГц.

З поглибленням досліджень у галузі електромагнітної сумісності, електромагнітних перешкод та технологій захисту в енергетичних системах, системи вимірювання перехідних електромагнітних полів в енергосистемах повинні мати такі характеристики: (1) достатню смугу пропускання; (2) хорошу чутливість на різних рівнях амплітуди, оскільки амплітуда тестованого сигналу потенційно може значно змінюватися; (3) компактний та мініатюрний розмір, який не повинен впливати на вимірюване електромагнітне середовище; та (4) ефективні заходи екранування, заземлення та фільтрації для придушення синфазних перешкод [20].

Сучасні системи вимірювання перехідного електричного поля мають такі проблеми, як недостатня пропускна здатність, обмежена точність та нестабільні коефіцієнти амплітуди. В електромагнітному середовищі енергетичних систем спектр стаціонарних сигналів може бути на рівні 50 Гц або навіть нижче. Однак існуючі вимірювання електричного поля часто зосереджені на покращенні високочастотних характеристик, що робить їх неефективними для вимірювання низькочастотних сигналів. В енергетичних мережах комутаційні операції силової електроніки, такої як IGBT, можуть створювати спектральні складові в діапазоні кількох кГц або навіть нижче. Сучасні вимірювальні системи мають труднощі з ефективним реагуванням як на низькочастотні, так і на високочастотні сигнали електромагнітних перешкод [21].

Для досягнення стійких до перешкод вимірювань у складних, сильних електромагнітних середовищах широко використовується волоконно-оптична технологія [23]. Однак після численних польових застосувань було виявлено, що безпосередня передача аналогових сигналів через волоконно-оптичні лінії зв'язку має такі недоліки:

- Аналогова смуга пропускання обмежена волоконно-оптичним передавачем і приймачем, при цьому низькочастотне відсікання зазвичай досягає лише близько 1 кГц, а досягнення високочастотного відсікання 600 МГц або вище є дуже складним завданням.
- Сигнали перехідного електричного поля в досліджуваному середовищі мають дуже широкий діапазон амплітуд, від десятків В/м до рівня кВ/м або навіть вище. У цьому діапазоні точність перетворення волоконно-оптичного каналу зв'язку для сигналів з меншими амплітудами є низькою та нестабільною, що призводить до значних похибок вимірювання та навіть ускладнює визначення ефективної амплітуди.

З розвитком високошвидкісних технологій збору даних, зокрема досягнень у технологіях аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) та програмованих польовими елементами вентилятих матриць (FPGA), стала можливою технологія цифрових вимірювань. Технологія цифрових вимірювань дозволяє передавати цифрові дані на великі відстані, що спрощує зберігання та обробку даних, а також може фіксувати перехідні сигнали з високою точністю. У Великій Британії Мохамед та ін. розробили нову логіку запуску на основі часу, реалізовану в FPGA, яка використовується для локалізації часткових розрядів у силових кабелях [23]. Руссер та ін. розробили систему вимірювання електромагнітних перешкод у часовій області в реальному часі, засновану на технології збору даних та цифрової обробки сигналів, що застосовується в діапазоні частот від 30 МГц до 1 ГГц [25]. Однак вона не може задовольнити вимоги до вимірювань для енергетичних систем у низькочастотному діапазоні. Ченг та ін. розробили систему збору даних імпульсних сигналів на основі технології FPGA. Ця система використовує волоконну оптику для безпосередньої передачі цифрових сигналів, вирішуючи проблему спотворення сигналу при передачі аналогових сигналів на великі відстані через кабелі під час вимірювань імпульсного пучка ядерного вибуху. Таким чином, очевидно, що цифрова вимірювальна технологія пропонує певні переваги над традиційними аналоговими методами вимірювання з точки зору вимірювання, передачі та обробки сигналів.

Наскільки відомо авторам, не було опубліковано жодних досліджень багатоканальних вимірювальних систем, розроблених для вимірювань надширокопasmових електромагнітних перехідних процесів, які б досягали синхронізації часової послідовності між кількома каналами вимірювання. Такі системи користуються великим попитом для широкого кола критичних застосувань, включаючи локалізацію та виявлення джерел перехідного електромагнітного випромінювання, таких як часткові розряди або навмисні електромагнітні перешкоди (ІЕМІ), вимірювання стану енергетичного обладнання, моніторинг та діагностику несправностей на основі багатофізичних перехідних сигналів, що включають електромагнітні поля, перенапругу та перевантаження по струму тощо.

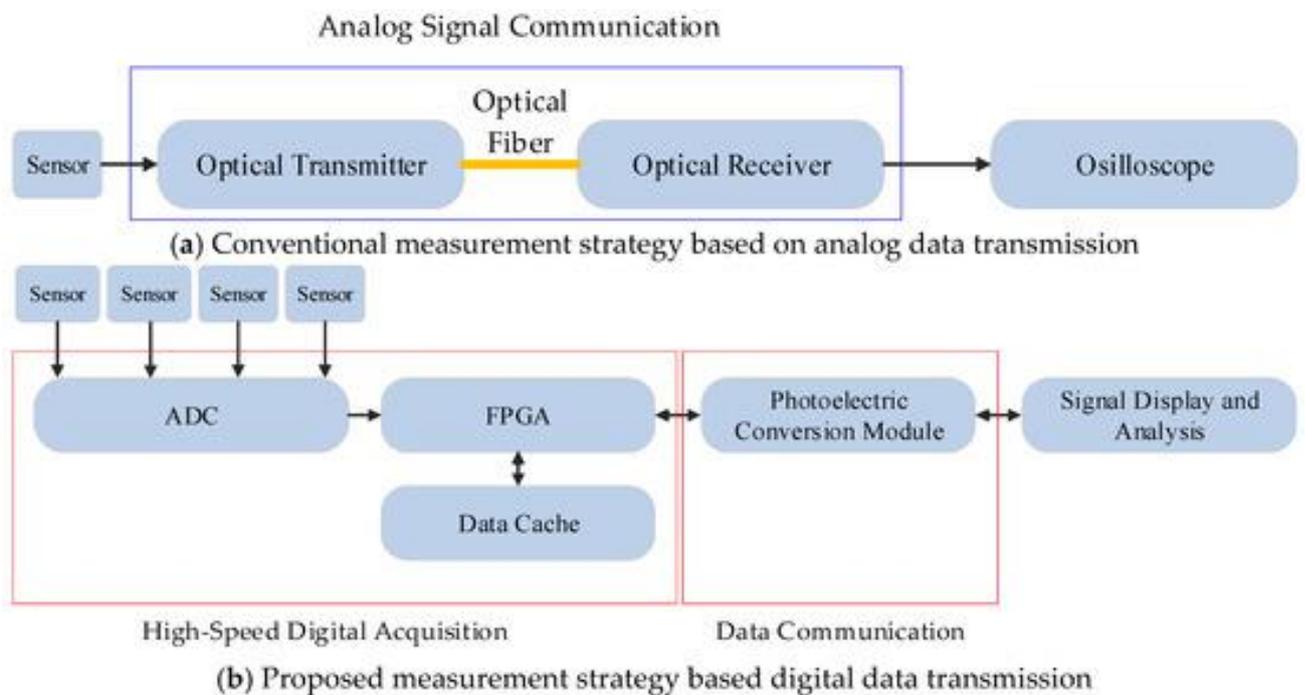


Рисунок 2.1 – Порівняння стратегій вимірювання між традиційною аналоговою передачею даних та цифровою передачею даних

Традиційні стратегії вимірювання передають аналогові сигнали через оптичні волокна, що стикається з такими проблемами, як нестабільні амплітудні коефіцієнти, що призводять до великих похибок вимірювання, слабка стійкість аналогових сигналів до електромагнітних перешкод та обмежена смуга пропускання через обмеження оптоелектронного модуля перетворення. Натомість, у цій статті рекомендується оцифровувати аналоговий сигнал на виході датчика, тобто на вході вимірювальної системи, та передавати цифровий сигнал через оптоволоконне з'єднання. Такий підхід не тільки підвищує стійкість до перешкод, але й ефективно долає проблеми

обмеження смуги пропускання та нестабільного амплітудного коефіцієнта, що викликаються оптоелектронними пристроями. Порівняння стратегій вимірювання та принципова діаграма показані на рисунку 2.1 .

2.2 Датчик електричного поля

Монопольні антени широко використовуються для випробування електромагнітних перешкод, оцінки електромагнітної сумісності та вимірювань електромагнітного середовища. Коли компонент електричного поля електромагнітної хвилі присутній навколо антени, він індукує напругу вздовж осевого напрямку антени, тим самим виявляючи електричне поле в середовищі. Коли антена задовольняє умову електричної малості (де геометричний розмір набагато менший за найкоротшу довжину хвилі в сигналі), час поширення сигналу через антену набагато коротший за час наростання переднього фронту сигналу, таким чином зберігаючи початкову форму імпульсу. Використовуючи електрично малу антену, яка значною мірою не залежить від частоти, як приймальну антену для виявлення перехідних імпульсних електричних полів, можна виміряти форму хвилі падаючого електричного поля в часовій області з мінімальними спотвореннями. Крім того, антена має характеристику всенаправленого прийому електромагнітних полів у горизонтальній площині.

Конструкція зонда для вимірювання електричного поля складається переважно з монопольної антени, схеми формування сигналу та металевого екрануючого корпусу. Монопольна антена перетворює сигнали електромагнітного поля в просторі на електричні сигнали. Вихідна потужність сигналу монопольної електрично малої антени обмежена, що робить її непридатною для передачі через коаксіальні кабелі. Тому для досягнення перетворення імпедансу та узгодження антени використовується високоомний вхід операційного підсилювача. Металевий екрануючий корпус охоплює внутрішню плату, слугуючи як екраном, так і дзеркальною заземлювальною площиною для антени.

2.3 Принцип монопольної малої антени

Електрично мала антена працює за умови $h \ll \lambda/2\pi$, де h - висота антени, λ – робоча довжина хвилі. Вона має такі переваги, як малий геометричний розмір, широка смуга пропускання, регульований та великий діапазон вимірювання, всеспрямоване вимірювання та регульовані параметри, що

означає, що вона зазвичай використовується для вимірювання сигналів перехідного електричного поля. У цьому режимі монопольна антена в основному функціонує як ємнісний елемент, реагуючи на струм зміщення, індукований падаючим електричним полем. Індукована напруга V на клеммах антени пропорційна ефективній висоті h_e та локальне електричне поле E :

$$V(t) = h_e \cdot E(t), h_e \approx \frac{h}{2} \quad (2.1)$$

Чутливість стрижневої антени можна регулювати, змінюючи її висоту h , щоб пристосуватися до різних умов вимірювання. Щоб забезпечити широкосмугову частотну характеристику, антену можна змоделювати як паралельний RC-контур, де C_a являє собою ємність антени та R_l – імпеданс навантаження вимірювальної системи. Передавальна функція $H(s)$ системи задається як

$$H(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = \frac{sR_l C_a h_e}{1 + sR_l C_a} \quad (2.2)$$

З цього, нижня гранична частота f_L можна виразити як

$$f_L = \frac{1}{2\pi(C_l + C_a)R_l} \quad (2.3)$$

Для розширення низькочастотної характеристики (наприклад, до 50 Гц) використовується високоімпедансна буферна схема для максимізації R_l , що забезпечує точні вимірювання як стаціонарних, так і перехідних сигналів. Вища гранична частота f_h обмежений розміром антени, який визначається умовою $h \ll \lambda/2\pi$.

Порівняно з традиційними датчиками D-Dot, які вимірюють похідну електричного поля за часом і потребують числового інтегрування, монопольна антена безпосередньо вимірює напруженість електричного поля. $E(t)$ це спрощує ланцюг обробки сигналу, зберігаючи при цьому широкосмугову характеристику, що робить його особливо придатним для одночасного захоплення субнаносекундних перехідних процесів та низькочастотних стаціонарних компонентів.

Практичні міркування щодо проектування включають мінімізацію паразитної ємності та індуктивності для розширення високочастотної характеристики, а також оптимізацію геометрії антени для балансування чутливості та фізичних розмірів. Ці принципи гарантують, що монопольна антена досягає рівної характеристики в діапазоні частот від постійного струму до ГГц, що дозволяє проводити точні вимірювання електромагнітних процесів перехідного типу в енергосистемах.

2.4 Моделювання сенсора електричного поля

Для аналізу часової характеристики та амплітудно-частотних характеристик у частотній області було побудовано імітаційну модель у CST Microwave Studio, як показано на рисунку 2.2. Модель має стрижневу антену, виконану у вигляді циліндричної структури висотою 10 мм та радіусом 1 мм. Стрижень оточує порожниста кубоподібна оболонка товщиною 2 мм. На верхній поверхні порожнистої оболонки створено отвір радіусом 2 мм, всередині якого розташований циліндричний стрижень. Як циліндричний стрижень, так і порожниста оболонка виготовлені з міді, а решта області моделювання налаштована на вакуум.

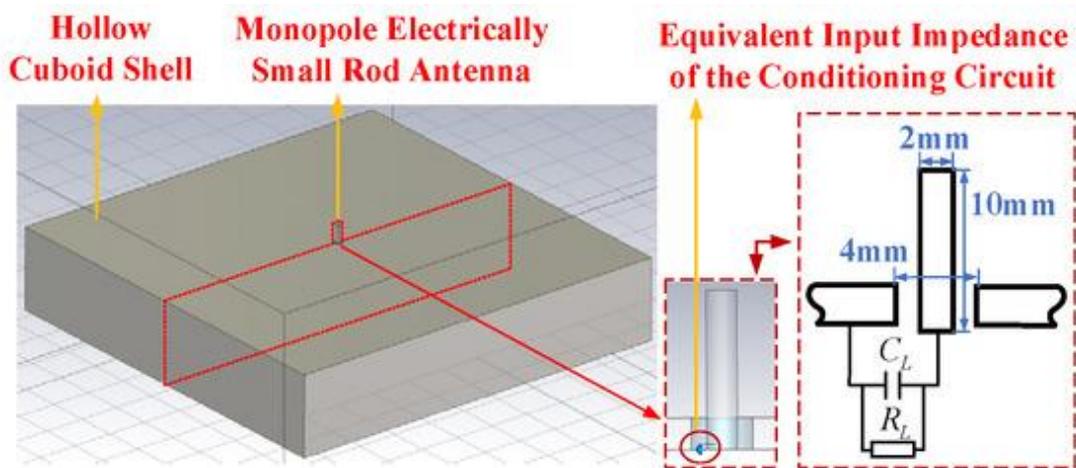


Рисунок 2.2 – Модель моделювання методом скінченних елементів для датчика перехідних процесів електричного поля

Враховуючи, що потенціал заземлення схеми кондиціонування дорівнює потенціалу заземлення металевого корпусу при практичному використанні датчика, розроблена схема кондиціонування має еквівалентний вхідний імпеданс, що складається з конденсатора ємністю 5 пФ, з'єднаного паралельно з резистором 1012 Ом. Для врахування цього між полюсом і металевим корпусом

додано зосереджений елемент. Датчик має металевий корпус і закриту конструкцію для екранування від зовнішніх електромагнітних перешкод, яка має компактну конструкцію, щоб уникнути впливу на результати випробувань. Розмір датчика становить 4 см × 4 см × 3 см (довжина × ширина × висота).

Якщо як збудження використовується гауссова імпульсна форма хвилі, крива амплітудно-частотної характеристики стрижневої монопольної антени показана на рисунку 2.3 з пропускною здатністю 3 дБ в діапазоні від постійного струму до 1,966 ГГц.

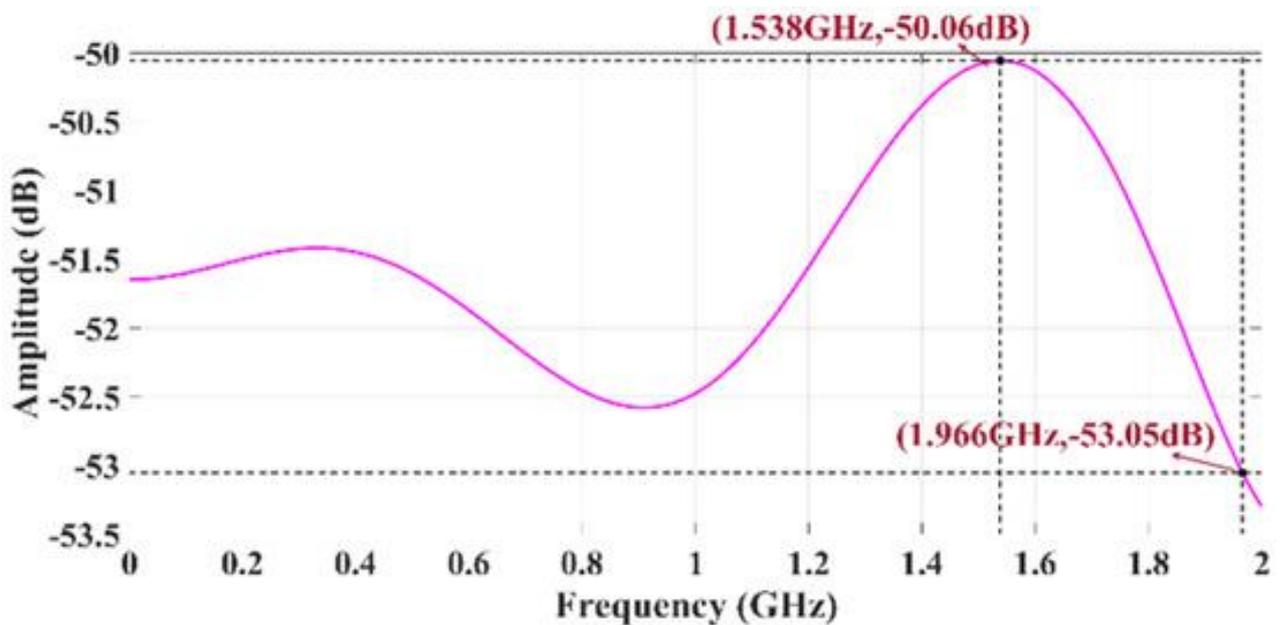


Рисунок 2.3 – Крива амплітудно-частотної характеристики датчика перехідного електромагнітного поля

2.5 Проектування схеми передавача

Щоб максимізувати передачу енергії електричного поля до монопольної антени, імпеданс антени був узгоджений з імпедансом вимірювальної системи. Для перетворення високого імпедансу в 50 Ом було використано BUF802 виробництва Texas Instruments. BUF802 має два режими роботи: буферний режим (BF) та режим композитної петлі (CL), кожен з яких підходить для різних ситуацій.

У режимі CL BUF802 має основний тракт та допоміжний тракт. Вхідний сигнал розділяється конденсаторним дільником на високочастотну та низькочастотну складові. Високочастотний сигнал проходить основним трактом, тоді як низькочастотний сигнал проходить допоміжним трактом. Ці дві складові потім рекомбінуються на виході, формуючи кінцевий вихідний

сигнал. Існують сегменти перехідної смуги як у низькочастотному, так і у високочастотному діапазонах, де основний та допоміжний тракти працюють разом для створення вихідного сигналу. Широкосмугове вимірювання вимагає, щоб амплітудно-частотна характеристика датчика була узгодженою в низькочастотному та високочастотному діапазонах. Якщо є різниця в коефіцієнті підсилення, результати вимірювання покажуть амплітудне спотворення. Принципова схема схеми формування сигналу показана на рисунку 2.4. Випробування частотної зміни було проведено на схемі формування сигналу за допомогою аналізатора мережі, виміряного за параметром S21, як показано на рисунку 2.5. Згідно з кривою частотної характеристики, смуга пропускання вимірювання схеми формування сигналу становить від постійного струму до 1,65 ГГц.

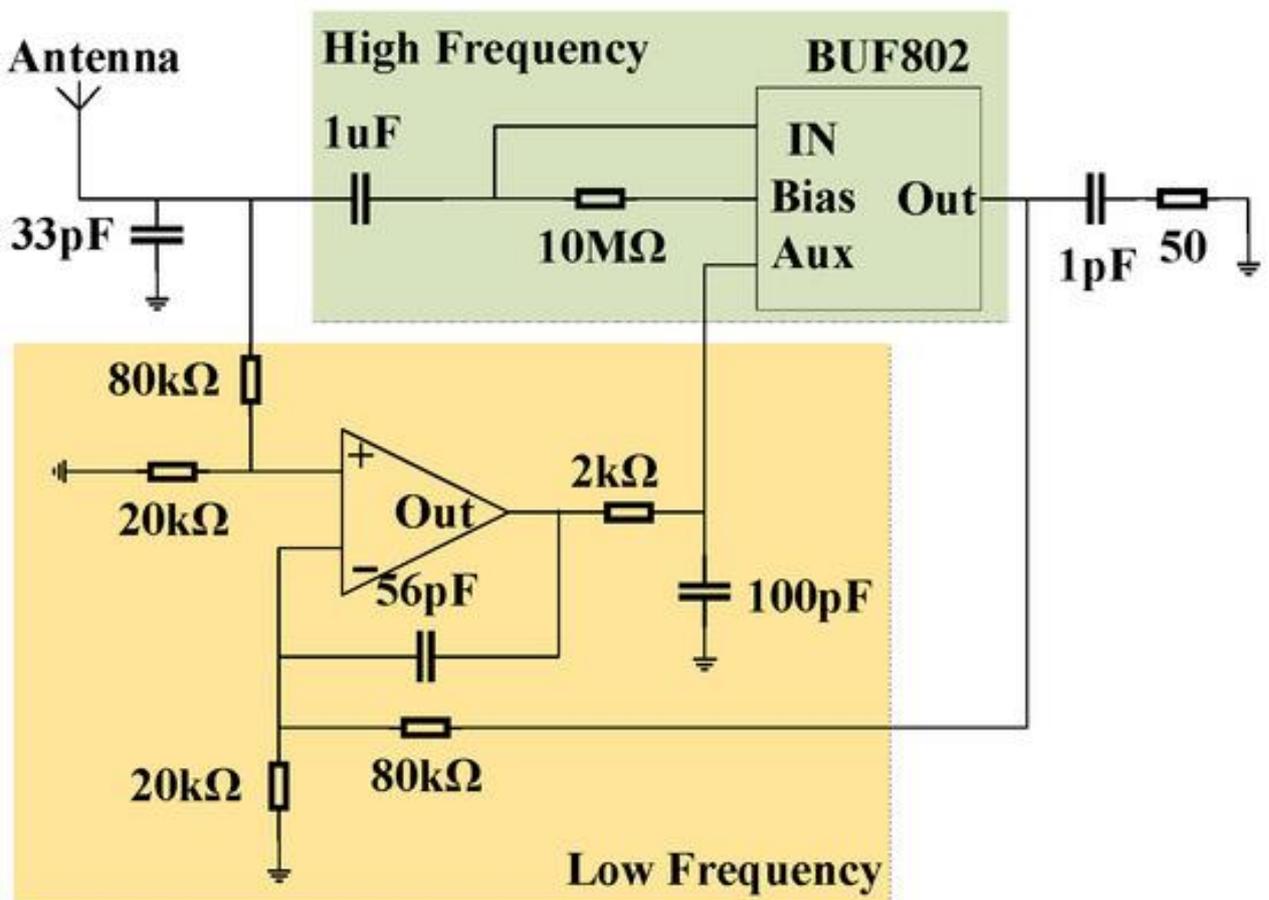


Рисунок 2.4 – Принципова схема схеми кондиціонування.

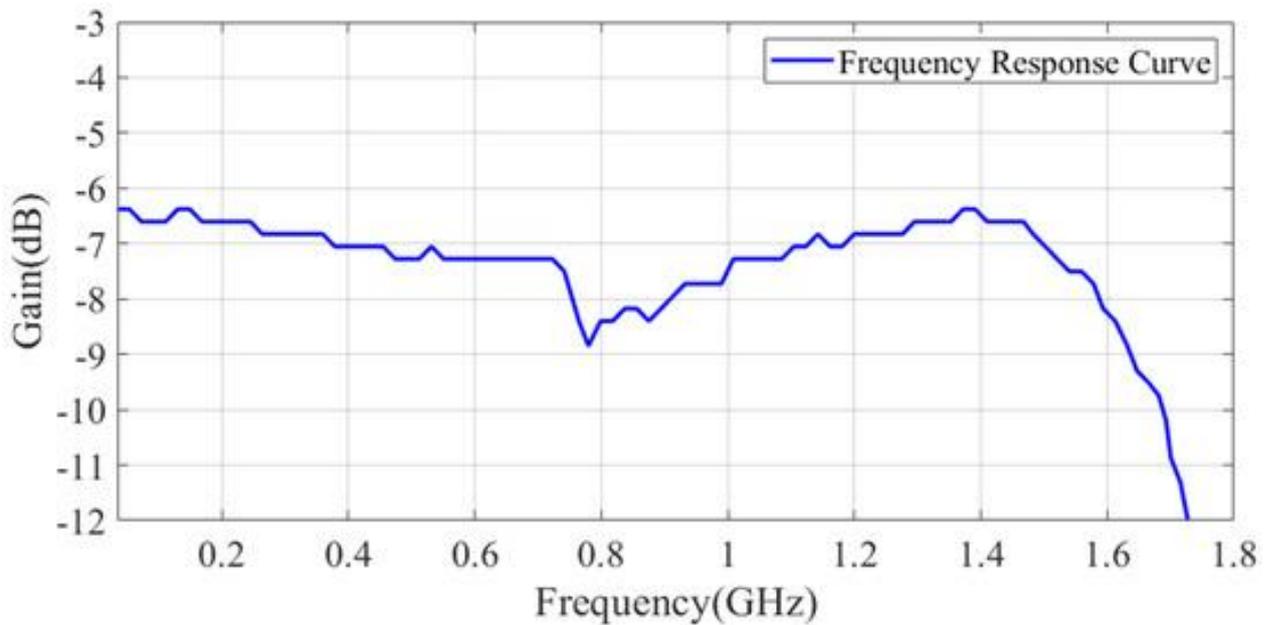


Рисунок 2.5 – Тестування частотної характеристики схеми формування сигналу за допомогою векторного аналізатора ланцюгів R&S ZVA24

2.6 Високошвидкісна цифрова система збору даних на основі FPGA

У даній роботі запропоновано оцифровувати аналогові сигнали, що видаються датчиками на вході вимірювання, а потім передавати цифрові сигнали через оптичні волокна. На відміну від традиційних осцилографів, модуль високошвидкісного аналого-цифрового перетворення в цій системі також повинен виконувати такі завдання, як аналого-цифрове перетворення, волоконно-оптичний зв'язок, зберігання великих обсягів даних та дистанційне налаштування параметрів.

Системні компоненти високошвидкісної цифрової системи збору даних показано на рисунку 2.6. Основні компоненти включають блок керування FPGA, блок високошвидкісної цифрової дискретизації АЦП, блок буферизації даних, блок генерації та керування часовими параметрами, а також інтерфейс передачі даних.

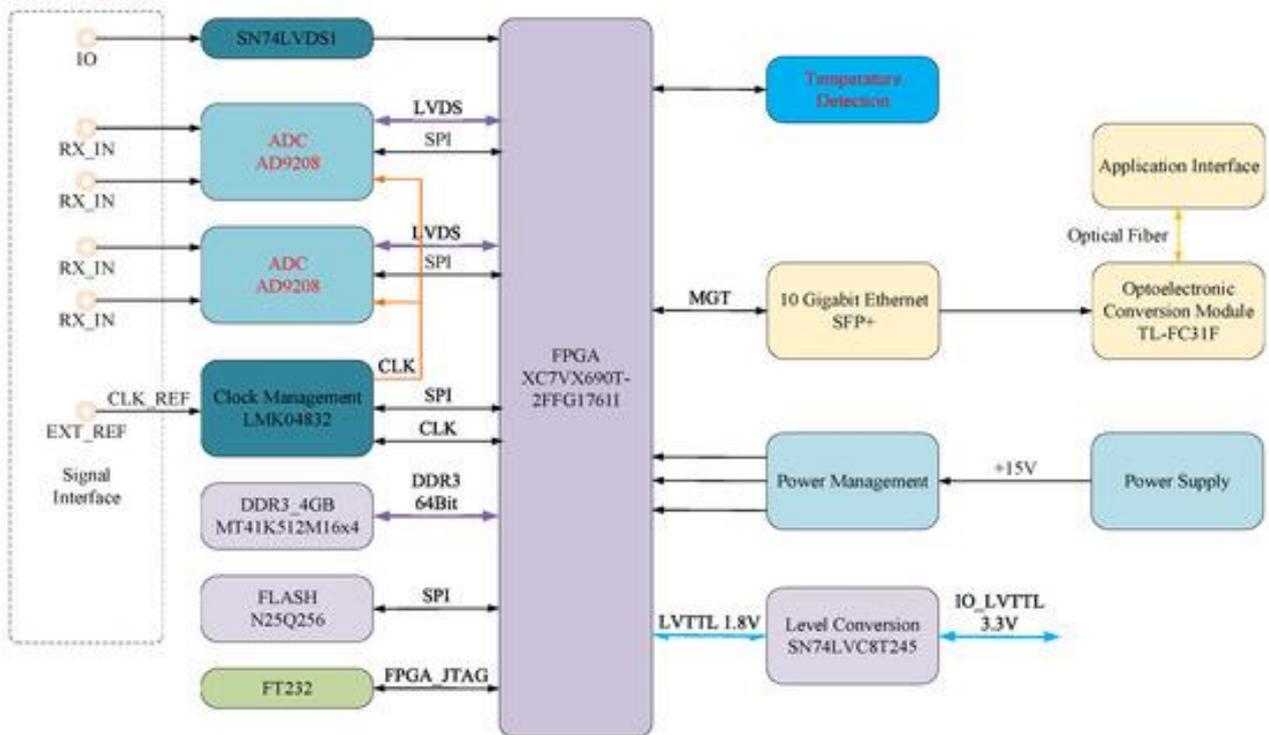


Рисунок 2.6 – Функціональна блок-схема високошвидкісної цифрової системи збору даних

Логічне керування FPGA

Мікросхема FPGA в основному відповідає за налаштування та керування мікросхемою тактового генератора та АЦП для забезпечення їхньої належної роботи. Основним керуючим чіпом, що використовується в системі збору широкосмугових перехідних електромагнітних імпульсних сигналів, є Xilinx Virtex-7 серії XC7VX690T-2FFG1761I. Цей чіп має 600 000 логічних комірок, 36 пар GTN та підтримує інтерфейси PCIe x8 Gen 2. Він також має 850 інтерфейсів вводу/виводу користувача, що робить його адаптованим до різних інтерфейсів застосувань. Крім того, FPGA включає 3100 зрізів DSP та підтримує ядро MIG, що забезпечує доступ до пам'яті DDR3, забезпечуючи високу продуктивність обробки даних та буферизації. Його основні функції включають наступне:

1. FPGA отримує високошвидкісні дискретизовані цифрові сигнали від АЦП (аналого-цифрового перетворювача) та обробляє ці дані в режимі реального часу, включаючи такі операції, як буферизація даних, фільтрація та віконна робота.
2. Він реалізує контроль та управління складними потоками даних, розділяючи та буферизуючи дані для подальшого зберігання або передачі.
3. FPGA зберігає дані, отримані від АЦП, у високошвидкісній пам'яті (наприклад, DDR3) та передає ці дані на інші модулі або зовнішні пристрої за

потреби, наприклад, передаючи їх на головний комп'ютер через оптичні волокна.

4. FPGA відповідає за передачу отриманих цифрових сигналів до зовнішніх систем через інтерфейс Quad Small Form-factor Pluggable (QSFP), забезпечуючи керування інтерфейсом та протоколи зв'язку. Зовнішній рівень вводу/виводу становить 3,3 В, тоді як рівень вводу/виводу FPGA — 1,8 В. Для досягнення сумісного перетворення рівнів між ними використовується мікросхема SN74LVDSI.

5. Точне керування синхронізацією є критично важливим у високошвидкісних системах збору даних. FPGA генерує та керує тактовими сигналами для всієї схеми аналого-цифрового перетворення, забезпечуючи синхронізацію між АЦП та іншими компонентами.

Високошвидкісне аналого-цифрове перетворення

Функція аналого-цифрового перетворення в основному виконується за допомогою високошвидкісних мікросхем АЦП, враховуючи такі фактори, як пропускна здатність, частота дискретизації, вимоги до синхронізації, споживання енергії та протоколи зв'язку. Для цієї мети було обрано дві високошвидкісні мікросхеми АЦП, AD9208 від Analog Devices (ADI). AD9208 - це двоканальний 14-бітний АЦП з максимальною частотою дискретизації 3000 MSPS. Цей пристрій оптимізований для широкої вхідної смуги пропускання, високої частоти дискретизації, хорошої лінійності та низького споживання енергії в невеликому корпусі. Він включає вбудовані буфери та схему вибірки та зберігання, спеціально розроблені для низького енергоспоживання, малого розміру та простоти використання. Продукт використовується для вибірки широкосмугових аналогових сигналів. Це двоканальне ядро АЦП використовує багатоступеневу диференціальну конвеєрну архітектуру з інтегрованою логікою корекції помилок на виході. Кожен АЦП має широкосмуговий буферизований вхід, що підтримує різні вибрані діапазони вхідних сигналів. Інтегроване джерело опорної напруги спрощує конструкцію. Виходи даних кожного АЦП внутрішньо підключені до додаткового модуля децимації 1/2.

Як аналоговий вхід, так і тактовий сигнали є диференціальними вхідними сигналами. Виходи даних кожного АЦП внутрішньо підключені до двох цифрових перетворювачів з пониженням частоти (ЦПД). Кожен ЦПД складається з чотирьох каскадних каскадів обробки сигналів: числово-керованого генератора (ЧКГ) та трьох напівдіапазонних фільтрів децимації, які підтримують децимацію $2\times$, $4\times$ та $8\times$.

Кеш даних

Оскільки застосування передбачає захоплення сигналів наносекундних імпульсів з високою частотою дискретизації та забезпечення тривалості зберігання на мілісекундному рівні, система вимагає великої ємності пам'яті. Щоб вирішити проблеми щодо потенційних обмежень пропускної здатності пам'яті з двома 12-бітними АЦП, що працюють зі швидкістю 3 ГІ/с кожен, наша система використовує чотири мікросхеми пам'яті Micron MT41K256M16 DDR3, кожна з яких має 16-бітну ширину даних та ємність 4 Гбіт. Налаштовані паралельно, вони утворюють 64-бітний інтерфейс пам'яті DDR3 загальним обсягом 2 гігабайти (ГБ), безпосередньо підключений до FPGA для високошвидкісного збору та зберігання даних. Така конструкція гарантує, що наша система може зберігати та обробляти дані з повною швидкістю, що генерується АЦП, ефективно зменшуючи проблеми, пов'язані з обмеженнями пропускної здатності пам'яті. Флеш-пам'ять використовується для зберігання конфігурації енергонезалежного FPGA.

Генератор тактових імпульсів

Частота тактового сигналу дискретизації розробленої нами цифрової системи збору даних фіксована на рівні 3 ГГц. Для забезпечення опорного тактового сигналу для всієї системи дискретизації ми обрали мікросхеми тактового сигналу LMK04832 від Texas Instruments (TI). LMK04832 може видавати 14 вихідних тактових сигналів з діапазоном частот до 3255 МГц, що забезпечує два тактові сигнали з частотою 3 ГГц для двох мікросхем AD9208. Крім того, завдяки використанню частотного поділу та роботі разом з FPGA, тактові сигнали розподіляються на модулі зберігання даних, інтерфейс зв'язку та інші модулі.

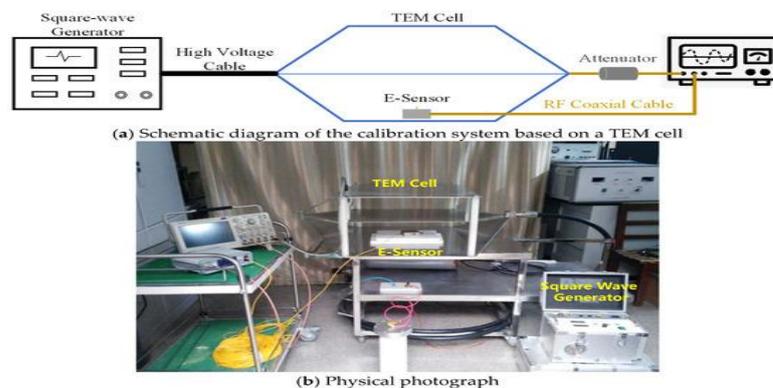
Передача даних

FPGA передає отримані цифрові дані з високою швидкістю через QSFP, причому цифрові сигнали передаються через оптичні волокна. Кожен канал зазвичай досягає швидкості передачі 10 Гбіт/с або навіть вище. Оптичні сигнали досягають віддаленого комп'ютера та перетворюються назад на електричні сигнали, які потім передаються через мережевий інтерфейс на головний комп'ютер для відображення та керування. Крім того, головний комп'ютер може надсилати команди керування через оптичні волокна для налаштування параметрів, запуску, скидання та керування системою збору даних.

2.7 Калібрування датчика електричного поля

Калібрування кривої коефіцієнта перетворення

Зазвичай електричне поле E у просторі вимірюється за допомогою датчика електричного поля, який видає сигнал напруги V . Необхідно визначити коефіцієнт пропорційності $K = V / E$ та оцінити лінійність K за різних значень інтенсивності електричного поля. У цій статті проводиться калібрування датчика на основі TEM-комірки, також відомої як камера поперечної електромагнітної хвилі [34, 36]. Вона побудована з середньою частиною зовнішнього провідника, утвореною шляхом з'єднання верхньої та нижньої пластин, тоді як середня частина внутрішнього провідника являє собою перегородку у формі смужки. Кінці перегородки поступово звужуються та з'єднуються з внутрішнім провідником коаксіального кабелю з характеристичним опором 50 Ом. Така конфігурація утворює основну ділянку передачі в середині та перехідні секції у формі рупора на обох кінцях. На один кінець подається прямокутний сигнал напруги, час наростання якого становить близько 800 пс, що відповідає верхній межі частоти $fH=0,35tr=437$ МГц. Потім у комірці TEM генерується рівномірно поширююча поперечна електромагнітна хвиля.



Рисунк 2.7 – Принцип калібрування датчика перехідного електричного поля на основі TEM-елементу

Використовуючи структуру TEM-комірки на рисунку 2.7 як приклад, вхідний порт підключено до джерела імпульсів через коаксіальний кабель, а вихідний порт підключено до осцилографа. Після визначення коефіцієнта перетворення K визначається, можна досягти числового коефіцієнта між вихідною напругою та вхідним електричним полем. Крива підбраного коефіцієнта перетворення показана на рисунку 2.8, який демонструє добру лінійність. Нахил підбраної лінії відображає коефіцієнт перетворення K , що становить приблизно 0,87 мВ/(В/м).

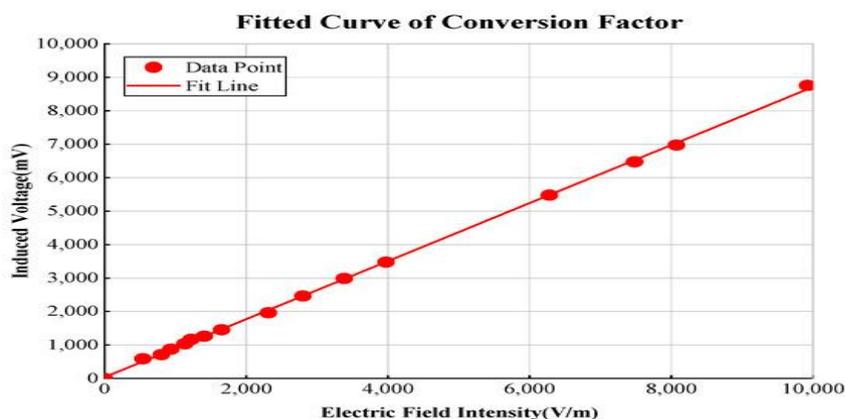


Рисунок 2.8 – Апроксимована крива коефіцієнта перетворення

Для калібрування в TEM-комірці обрано антену D-dot (SGE3-5G від Montena Inc.) та запропоновану монопольну антену, як показано на рисунку 2.9. У часовій області сигналу антена D-dot демонструє локальні коливання у високорівневій плоскій області прямокутної хвилі, що вказує на погану низькочастотну характеристику. Це спостереження додатково підтверджується в частотному аналізі, де спектр D-dot демонструє очевидні відмінності порівняно з опорною прямокутною хвилею. Для порівняння, запропонований датчик демонструє хорошу узгодженість з каліброваною прямокутною хвилею як у часовій області сигналу, так і в частотному спектрі, що підкреслює його чудову продуктивність.

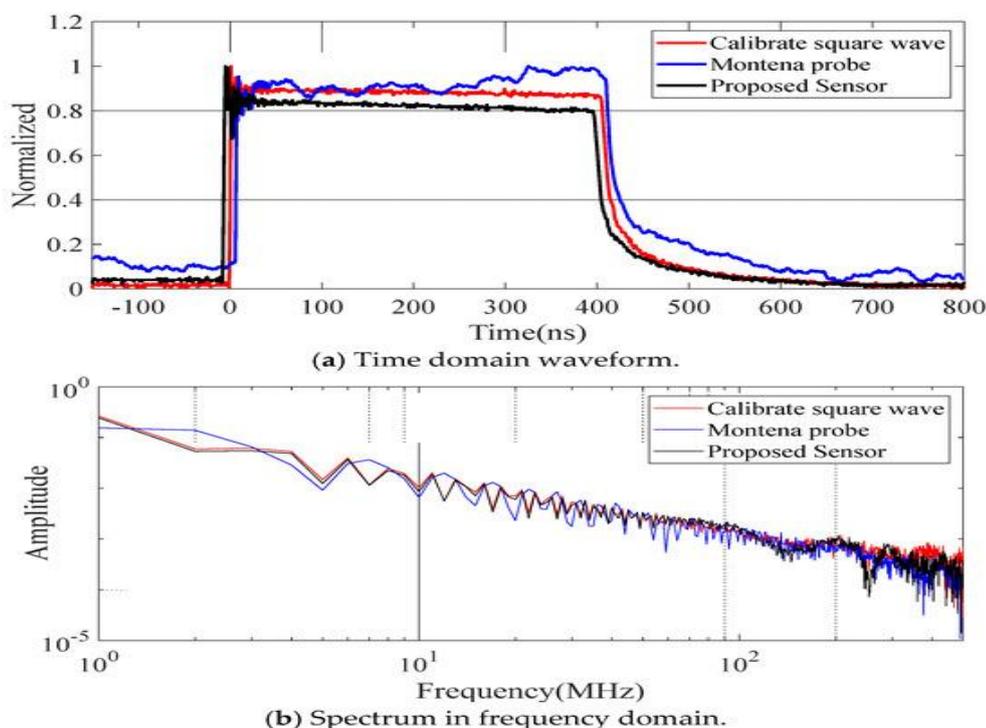


Рисунок 2.9 – Виміряна форма хвилі запропонованого датчика та антени D-dot у TEM-комірці

Калібрування для високочастотної характеристики

Однак калібрування за допомогою TEM-елементу недостатнє для оцінки верхньої межі частоти системи 1,6 ГГц. Тому для перевірки можливостей реагування системи в часовій області на її верхній межі частоти використовується моноконусна антена. Калібрування характеристик реагування високочастотної смуги пропускання датчика на основі моноконусної антени в часовій області було реалізовано, як детально описано в [37, 38]. Конфігурація калібрувального експерименту показана на рисунку 2.10. Опорна форма хвилі, що використовується в експерименті, являє собою біполярний імпульс з часом наростання $T_r = 160$ пс та позитивно-негативною затримкою імпульсу 500 пс, що показано на рисунку 2.11. Для порівняння, час наростання сигналу електричного поля, виміряного датчиком, становить 210 пс, що трохи більше, ніж час наростання опорного імпульсу. Відповідна верхня гранична частота становить приблизно 1,66 ГГц, що відповідає кривій розгортки частоти датчика, показаній на рисунку 2.5.

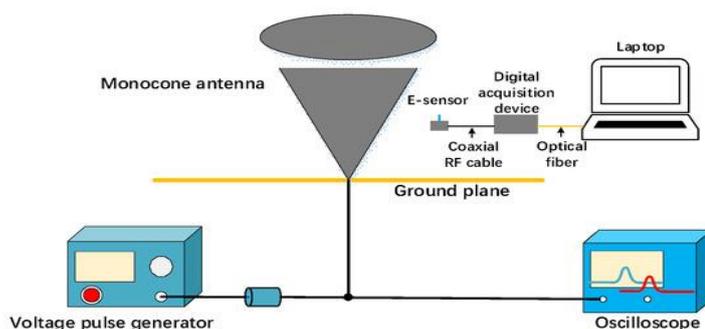


Рисунок 2.10 – Експериментальна конфігурація калібрування в часовій області на основі одноконусної антени

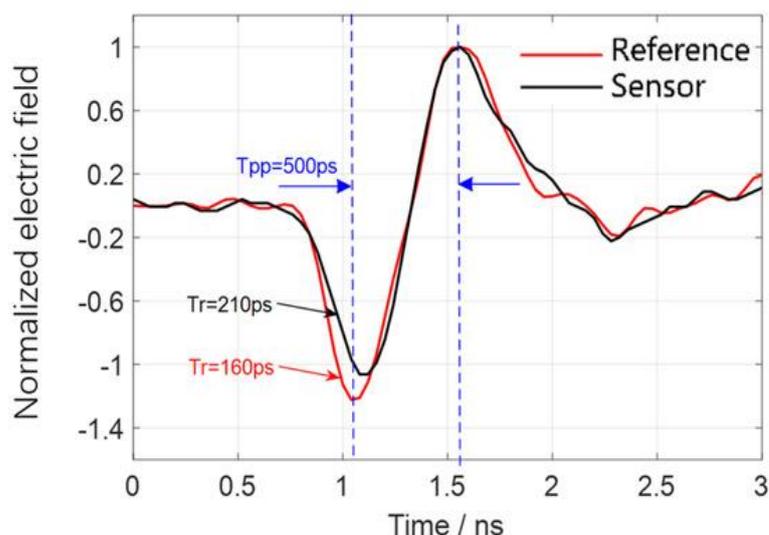


Рисунок 2.11 – Калібрувальна виміряна форма сигналу в часовій області

2.8 Випробування на станції постійного струму високої напруги (HVDC)

Виходячи з описаних вище принципів, сенсор електричного поля показано на рисунку 2.12, розмір контуру високошвидкісного модуля вибірки становить 156 мм × 166 мм × 72 мм, а передній датчик можна легко замінити. Остаточне фізичне зображення показано на рисунку 2.12b .



Рисунок 2.12 – Сенсор електричного поля

Для перевірки працездатності системи вимірювання електричного поля були проведені випробування на перетворювальній підстанції напругою ± 400 кВ. Випромінюване електричне поле вимірювалося за двох умов: під час роботи розмикача керованої установки та під час стабільної роботи поблизу шини змінного струму.

Під час процесу технічного обслуговування на перетворювальній підстанції з відключенням електроенергії необхідно сегментувати та відключити дві шини 350 кВ, що передбачає роботу кількох автоматичних вимикачів та роз'єднувачів з керованою установкою. Дослідження показали, що автоматичний вимикач з керованою установкою містить елегазову дугогасну камеру, яка має певну здатність пригнічувати перенапруги, спричинені розривом ненавантажених ліній. Тому ймовірність перенапруги, спричиненої повторним займанням дуги під час роботи автоматичного вимикача, вважається нижчою, ніж під час роботи роз'єднувача. Коли роз'єднувач розмикається, через його низьку ефективність гасіння дуги, операція розмикання може спричинити багаторазове повторне займання дуги в контактному зазорі, утворюючи дуже швидкі перехідні перенапруги, які пов'язані з корпусом керованої установки та заземлюються, генеруючи перехідне підвищення потенціалу заземлення. Одночасно виникають перехідні струми заземлення, і перехідні електромагнітні поля пов'язуються з навколишнім простором, що виявляється нашим датчиком. Імпульсні сигнали перехідного електричного поля, що генеруються роботою ГПС-перемикачів, можуть мати надзвичайно швидкий час наростання, досягаючи наносекундного або пікосекундного рівня, охоплюючи широкий

частотний спектр від кількох кілогерц (кГц) до кількох гігагерц (ГГц). Цей тестовий сценарій є одним із типових прикладних сценаріїв діагностики несправностей електрообладнання, і його також можна використовувати для оцінки роботи запропонованого датчика. Датчик електричного поля розміщується приблизно на відстані 1 м від вимикача, на висоті приблизно 0,5 м над землею. Датчики напруги та струму одночасно підключені до цифрової системи збору даних. Всі датчики підключені до високошвидкісної цифрової системи збору даних всередині екранованого корпусу за допомогою високочастотного екранованого коаксіального кабелю. Таким чином, можна одночасно вимірювати електричне поле, напругу та струм.

З рисунка 2.13 видно, що форми хвиль електричного поля, напруги та струму в часовій області демонструють подібні імпульси з однаковим часом виникнення. Три імпульси з часом 0 мкс, 17 мкс та 1190 мкс відображають моменти повторного запалювання дуги. На рисунку 2.14 показано локальну детальну форму хвилі в часовій області та відповідний спектр імпульсу в момент операції розмикання. Електричне поле виглядає як послідовність імпульсів із затухаючою коливальною формою хвилі, що досягає максимальної амплітуди 5,65 кВ, з часом наростання імпульсу 12 нс та часом спаду приблизно 1 мкс. Домінантні спектральні компоненти сигналу електричного поля становлять 15,6 МГц, що збігається з напругою та струмом, верхня частота яких перевищує 80 МГц.

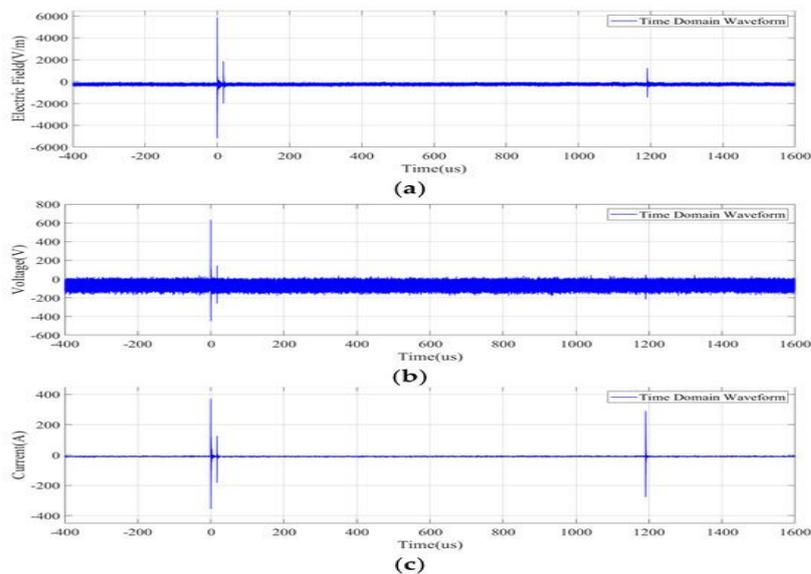


Рисунок 2.13 – Вимірний сигнал імпульсної послідовності поля перемикача у часовій області: (а) електричне поле; (б) напруга; (с) струм

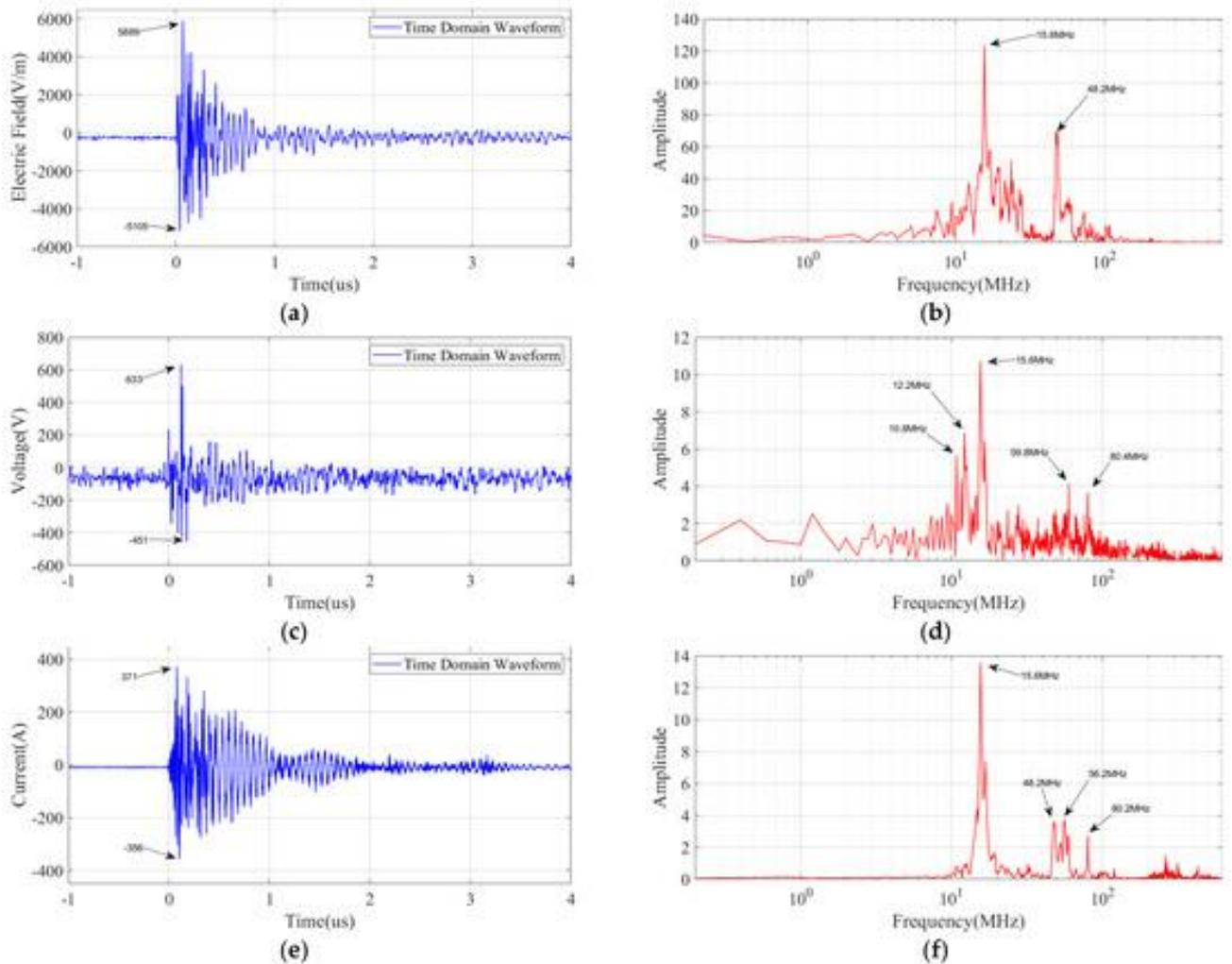


Рисунок 2.14 – Деталь імпульсного сигналу, що генерується роботою перемикача: (а) електричне поле в часовій області; (б) електричне поле в частотній області; (с) напруга в часовій області; (д) напруга в частотній області; (е) струм у часовій області; (ф) струм у частотній області

Це випробування підтверджує, що датчик має достатню швидкість відгуку та пропускну здатність для ефективного вимірювання наносекундних електромагнітних перехідних процесів, таких як сигнали електричного поля, напруги та струму одночасно.

2.9 Випробування стаціонарного електричного поля промислової частоти

Щоб перевірити низькочастотні характеристики розробленої нами монопольної антени, ми виміряли стаціонарне електричне поле під верхньою шиною змінного струму. Для порівняння відгуку різних антен на частоті живлення 50 Гц вимірювання включало антену D-dot від Montena Inc.,

традиційний монопольний датчик та розроблений нами надширокосмуговий монопольний датчик. Схема експерименту показана на рисунку 2.15.

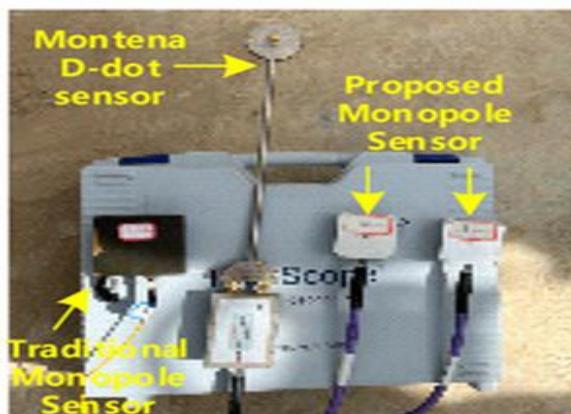


Рисунок 2.15 – Конфігурація обладнання для випробування

Вимірjana форма хвилі електричного поля показана на рисунку 2.16, а спектр – на рисунку 2.17. Синя крива представляє вимірювання, виконані традиційним монопольним датчиком, який демонструє значне спотворення форми хвилі та відображає лише період повторення приблизно 20 мс. Червона та чорна криві представляють форми хвиль, виміряні нашим розробленим надширокосмуговим монопольним датчиком, який точніше відображає форму хвилі напруги промислової частоти з частотою повторення 50 Гц. Це пояснюється тим, що схема формування сигналу датчика електричного поля використовує конструкцію з розділеним діапазоном узгодження для високих та низьких частот, що призводить до більш пологої кривої частотної характеристики в області низьких частот.

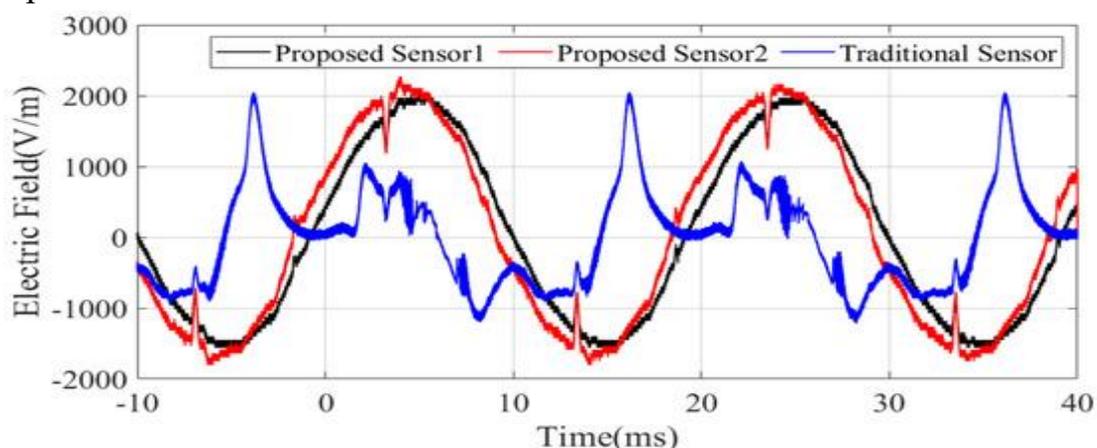


Рисунок 2.16 – Форма хвилі сигналу індукованого електричного поля промислової частоти

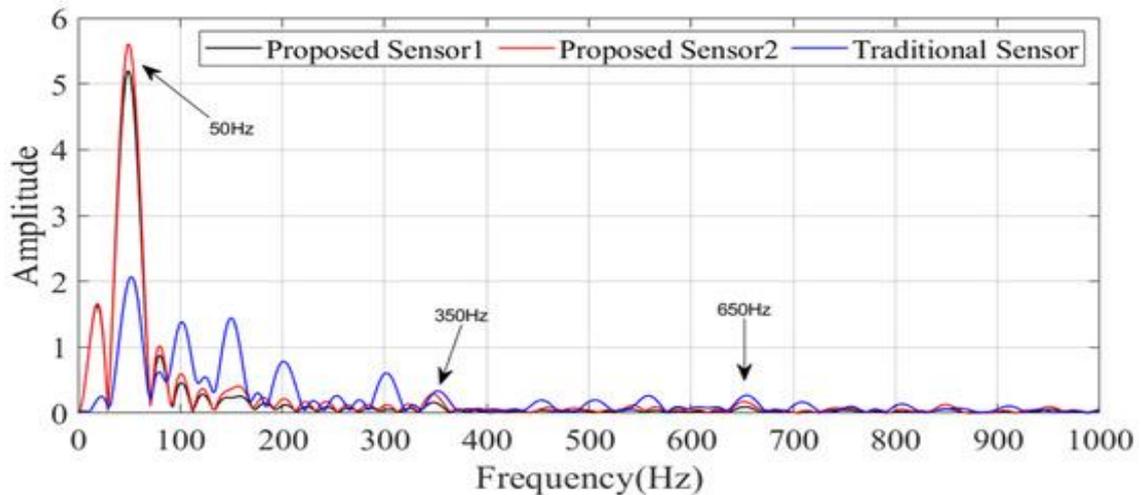


Рисунок 2.17 – Спектр сигналу електричного поля, індукованого промисловою частотою

Примітно, що на певних фазах форми хвилі промислової частоти накладаються піки протилежної полярності, які можуть бути спричинені високочастотними імпульсами від коронних розрядів на шинах. Згідно зі спектром, окрім основної частоти 50 Гц, усі вони містять деякі високочастотні компоненти, такі як 350 Гц та 650 Гц.

Для порівняння, антена D-dot від Montena Inc не вимірює ефективну форму хвилі електричного поля, оскільки зв'язане електричне поле від напруги промислової частоти перевищує нижню межу частоти датчика.

2.10 Висновки до розділу

Даний розділ присвячений питанням вимірювання широкосмугових сигналів перехідного електричного поля та розгляду технології вимірювання електромагнітних імпульсів на основі методів високошвидкісної цифрової дискретизації з використанням FPGA.

Досліджено конструкцію мініатюрного датчика перехідного електричного поля на основі електрично малої монопольної антени та розробляються відповідні схеми надширокосмугового вимірювання.

Представлена технологія локальної високошвидкісної цифрової дискретизації на основі FPGA, що дозволяє цифрову дискретизацію вимірюваних аналогових сигналів. Щоб вирішити поточні недоліки датчиків перехідного електричного поля, такі як низька продуктивність на низьких частотах, вузька смуга пропускання, недостатня точність, великі розміри, нестабільні амплітудні коефіцієнти та низька системна інтеграція, використано новий технічний підхід, заснований на високошвидкісній цифровій

дискретизації на FPGA та волоконно-оптичному зв'язку. Для розробки датчика зі стійкістю до електромагнітних перешкод використано передову високошвидкісну аналого-цифрову технологію для дискретизації аналогового сигналу та оптичні волокна для передачі цифрового сигналу. Такий підхід максимізує цілісність сигналу, одночасно досягаючи стійкості до електромагнітних перешкод, і ефективно покращує чутливість та стабільність коефіцієнта датчика.

Базуючись на принципі роботи стрижневої електрично малої антени, досліджено та оптимізовано конструкцію схеми формування індукованої напруги електричної дипольної антени, розширивши аналогову смугу пропускання датчика з початкових 1 кГц до 460 МГц до надширокої смуги пропускання від постійного струму до понад 1,6 ГГц.

Також представлено методику калібрування системи вимірювання перехідного електричного поля в часовій області. Проведені експериментальні дослідження. Порівняльний аналіз роботи різних антенних датчиків показав, що розроблений датчик перевершує датчики D-dot та традиційні монопольні антенні датчики в низькочастотних сценаріях. Запропонований датчик успішно захопив форму хвилі зв'язаного електричного поля на частоті промислової частоти (50 Гц), причому її форма хвилі відповідає періоду напруги промислової частоти, відповідно до теорії квазіелектростатичної поля. Для порівняння, антена D-dot не змогла виявити цей низькочастотний сигнал через шумові перешкоди, тоді як форма хвилі традиційного датчика демонструвала значні спотворення.

Проведені дослідження демонструють, що можливості вимірювання електричного поля датчика охоплюють діапазон від стаціонарних сигналів промислової частоти до сигналів частотно-перехідного перенапруги (VFTO) та високочастотних перехідних сигналів, таких як часткові розряди. Ця вимірювальна система демонструє великий потенціал у сферах моніторингу стану, виявлення несправностей та діагностики, а також у локалізації несправностей, спричинених частковими розрядами, в енергетичному обладнанні.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

3.1 Основи спектрального аналізу радіотехнічного сигналу

Спектральний аналіз сигналу можна здійснювати різними методами, але у цій публікації ми розглянемо особливості спектрального аналізу з урахуванням ШПФ.

Перша особливість – це векторний вхід алгоритму ШПФ. Алгоритм завжди працює з масивами значень вхідного сигналу і на виході виходить вектор комплексних відліків спектра сигналу. Алгоритм вимагає векторний вхід, але відліки сигналу часто надходять скалярно, тобто по одному. Тому перед безпосереднім ШПФ ми здійснюємо буферизацію, або накопичення відліків у вектор, а також певні операції передобробки, про які ми зараз поговоримо.

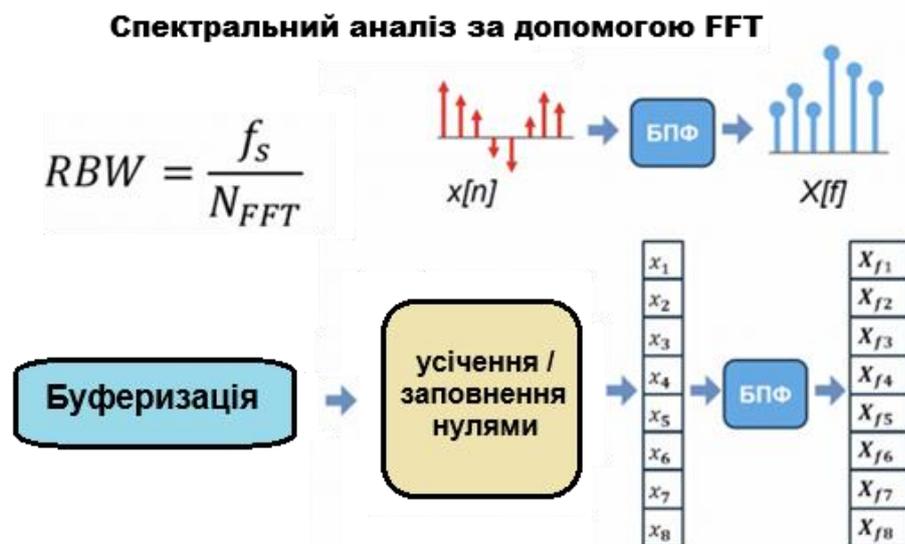


Рисунок 3.1 – Спектральний аналіз за допомогою ШПФ

Вхідний вектор тимчасових відрахунків ми називаємо вікном, а вихідний вектор називаємо точками або відліками ШПФ. Розмір вхідного вікна тим чи іншим способом дорівнює довжині ШПФ. Якщо у вікні відліків більше, ніж потрібно – зайві відкидаються, якщо менше – вхідний вектор доповнюється нулями.

Від того, скільки точок ШПФ ми отримуємо, залежить дозвіл за частотою, тобто та частотна сітка, в якій ми будемо встановлювати амплітуди та фази гармонік. Роздільна здатність також залежить від частоти дискретизації сигналу. По факту беремо весь частотний діапазон (від мінус половини частоти

дискретизації до половини частоти дискретизації) і заповнюємо його точками, у яких оцінюємо спектр.

Припустимо, що ми аналізуємо дійсний сигнал, і тому розглянемо область позитивних частот. Вона обмежується від нуля до половини частоти дискретизації. У цьому діапазоні ми розглядаємо $N/2$ точок ШПФ. Відстань між сусідніми точками дорівнює роздільній здатності за частотою. При кінцевому числі точок ШПФ спектр завжди буде виглядати дискретним, але це не означає, що у реальних сигналів є коливання на частоті f_k , є коливання більшої амплітуди на частоті f_{k+1} , а між ними нічого немає. Спектр безперервний, але ми змушені розглядати його на околицях конкретних частотних відрізків.

Насправді, ми не можемо підрахувати реальний спектр, але ми можемо оцінити його з кінцевою точністю. Часто ми оперуємо поняттям спектральної густини потужності, тобто потужності сигналу, що припадає на одиничний інтервал частоти, або потрапила в певну смугу на осі частот.

Часто ми не зможемо визначити точне положення тієї чи іншої гармоніки в спектрі, оскільки вона попадає між точками ШПФ. Енергія цієї гармоніки може виявитися у сусідніх точках ШПФ. Цей ефект називається витокм спектра. Уникнути його повністю неможливо, але згладити його вплив за рахунок втрати точності у визначенні інших параметрів допоможуть віконні функції.

Віконна функція – це набір вагових коефіцієнтів, що змінюють значення амплітуди відліків сигналу у часовій області. Коли ми здійснюємо спектральний аналіз великого сигналу, ми ділимо його на невеликі відрізки, які зважуємо віконною функцією і відправляємо на вхід алгоритму ШПФ. Різні віконні функції дозволяють виконати оцінки різних параметрів спектра з більшою точністю, але вносять спотворення.

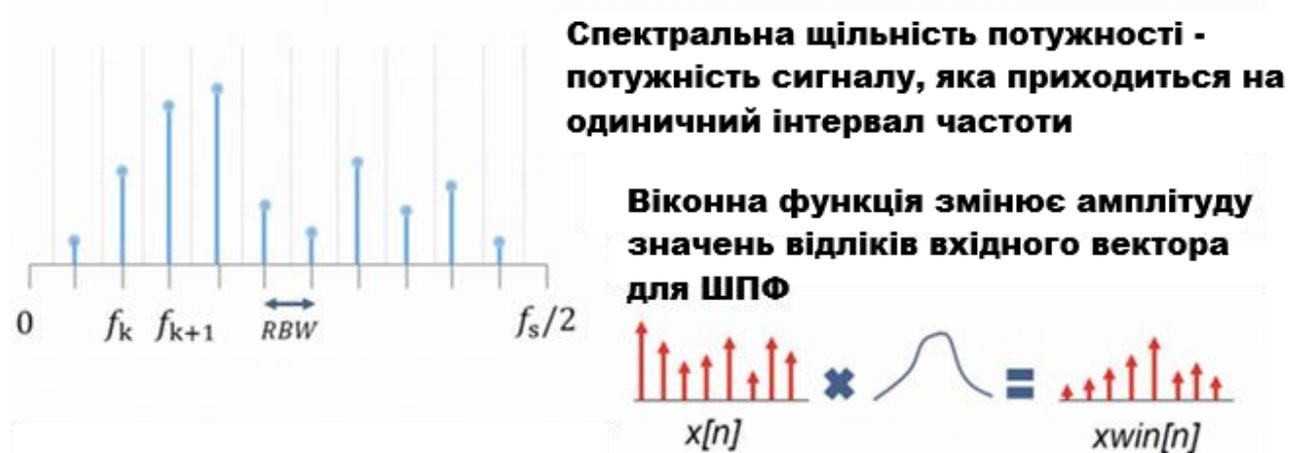


Рисунок 3.2 – Графічне пояснення спектральної щільності потужності та віконної функції

Ідеальна віконна функція в частотній області мала б форму прямокутника, і отримувала тільки енергію на околицях своєї частотної засічки. Але реальні функції в частотній області будуть збирати енергію з сусідніх смуг своїми бічними пелюстками, або ж не дозволять розрізнити близько розташовані гармоніки за рахунок дуже широкої основної пелюстки.

3.2 Спектральний аналіз сигналів в Matlab

Виконаємо спектральний аналіз у MATLAB за допомогою вбудованих функцій. Вхідні дані з часів попередньої публікації не змінилися, це запис колювання струни 220 Гц. Але тепер ми скористаємось вбудованою функцією для оцінки спектральної щільності потужності – `pwelch`.

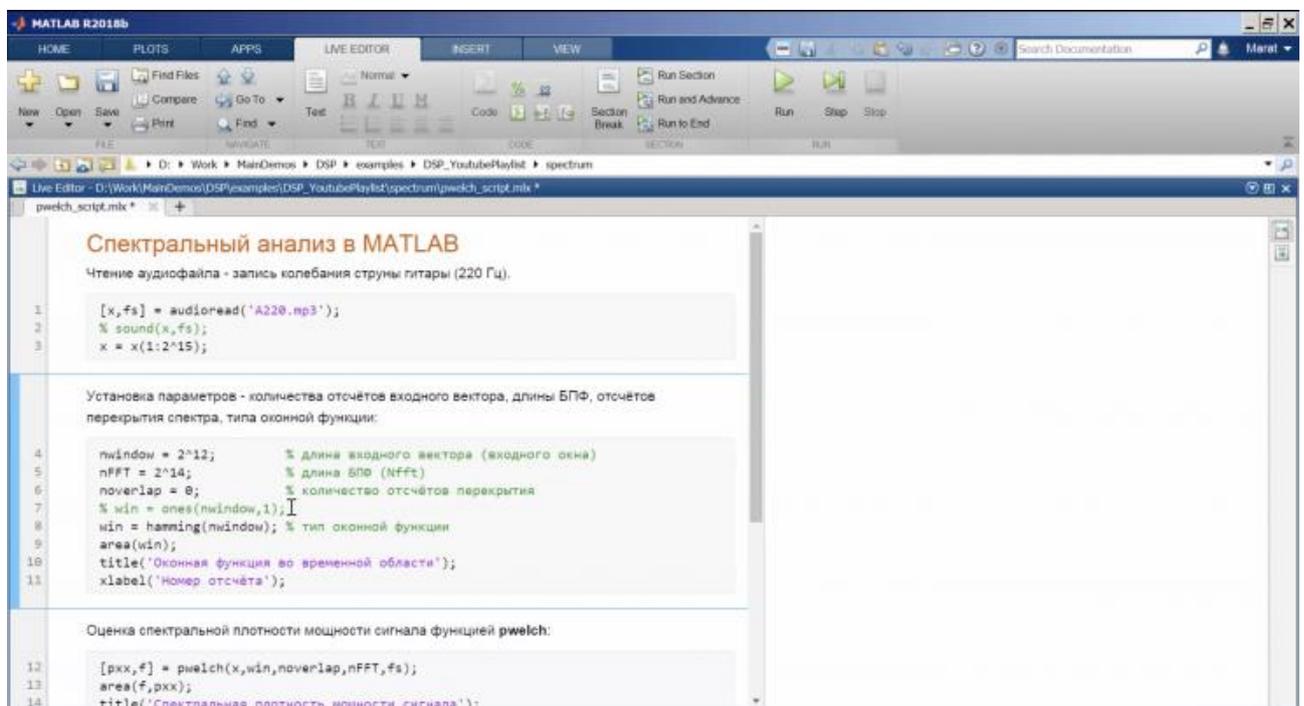


Рисунок 3.3 – Виклик функцій спектрального аналізу в середовищі Matlab

Як вхідні аргументи ця функція може приймати розмір вхідного вікна, довжину ШПФ, кількість відліків, що перекриваються (ця опція дозволяє отримати більш згладжений вид спектру, але поки що ми її не задіємо), і також ми вказуємо тип віконної функції. У нашому випадку вибрано функцію хеммінгу, але ви можете поміняти її на будь-яку іншу самостійно. Закоментовано створення прямокутного вікна. Ми можемо оцінити вид обраної віконної функції у часовій області.

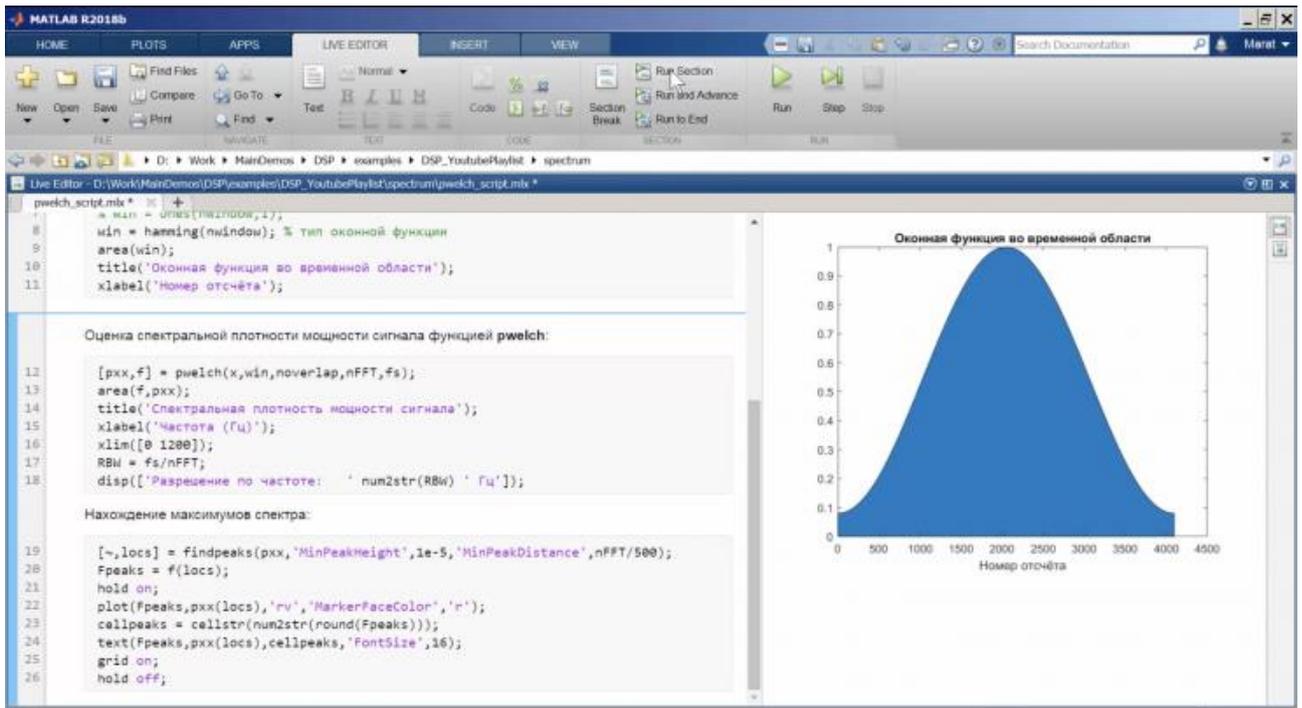


Рисунок 3.4 – Виклик функцій `rwelch` для оцінки спектральної густини потужності

Потім ми запускаємо основну функцію `rwelch` для оцінки спектральної густини потужності, а також підраховуємо поточний дозвіл за частотою.

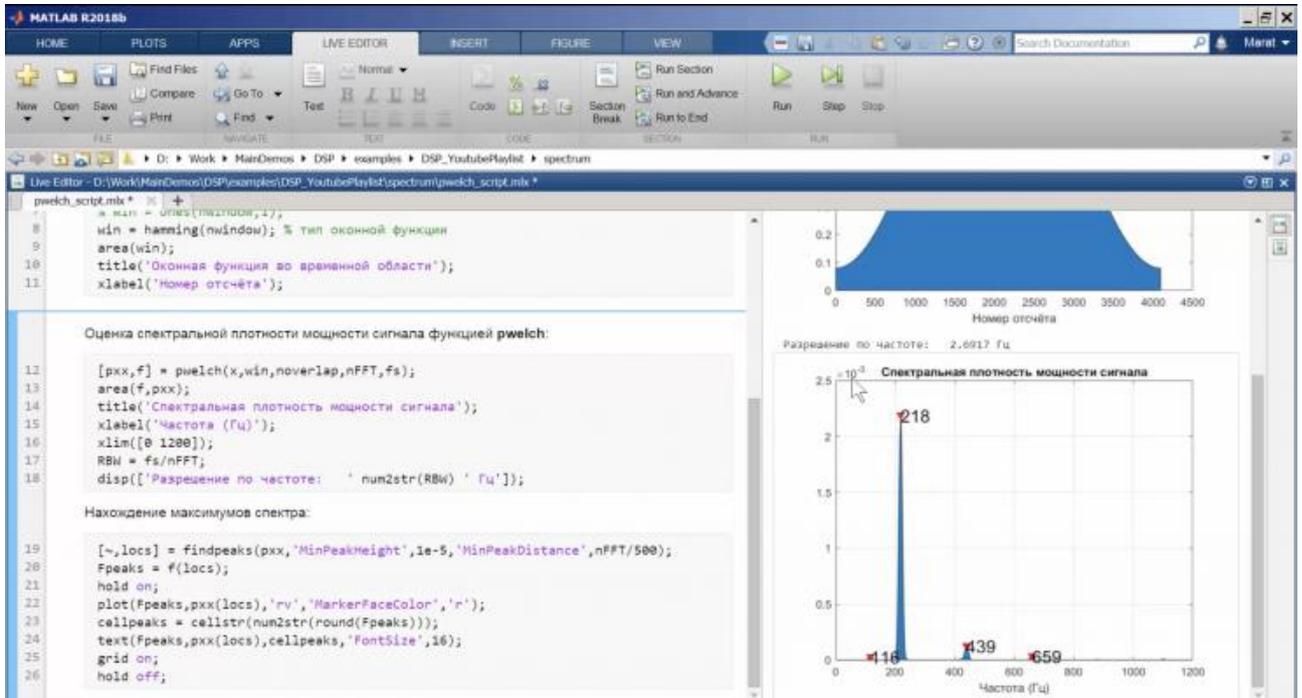


Рисунок 3.4 – Виклик функцій для побудови спектру сигналу

Поки що роздільна здатність в районі 2,7 Гц, значення положення піків ми розглядаємо з точністю до 1 Гц, оскільки округляємо їх функцією `round`. Ну

і спостерігаємо або проблеми з налаштуванням гітари, або ж відхилення пов'язані з нестачею точності та нерівною частотною сіткою.

Кількість точок вхідного сигналу менше, ніж кількість точок ШПФ, і доповнення нулями не піднімає фактичного дозволу, лише інтерполює спектр. Так як ми не змінюємо $nFFT$ - частотна сітка також не змінювалася, і положення піків не змінилися навіть після того, як ми збільшили розмір вікна, але тепер ми спостерігаємо більшу кількість гармонік, енергетики яких не вистачало короткому відрізку вхідного сигналу.

Якщо ж ми збільшимо кількість точок ШПФ, то частотна сітка тепер стала більш щільною, і оцінюємо положення піків точніше. Розглянемо нелінійні спотворення з погляду спектрального аналізу. Лінійним вважається зміни сигналів, що призводять до зміни амплітуд та/або фаз спектральних його компонент. Нелінійним називається зміни сигналів, що призводять до появи нових спектральних компонентів. Подібне визначення дозволяє нам описати лінійні та нелінійні системи з точки зору того, як вони впливають на спектр сигналу.



Рисунок 3.5 – Пояснення лінійної і нелінійної системи

Лінійна система змінить амплітуда і фаза спектральних відліків, у той час як нелінійна система додасть спектральні компоненти, яких не було в спектрі вхідного сигналу. Розглянемо лінійне та нелінійне спотворення синусоїди. По-перше, давайте подивимося на нашу синусоїду, вихідну синусоїда 220 Гц у часовій та частотній областях, також послухаємо її.

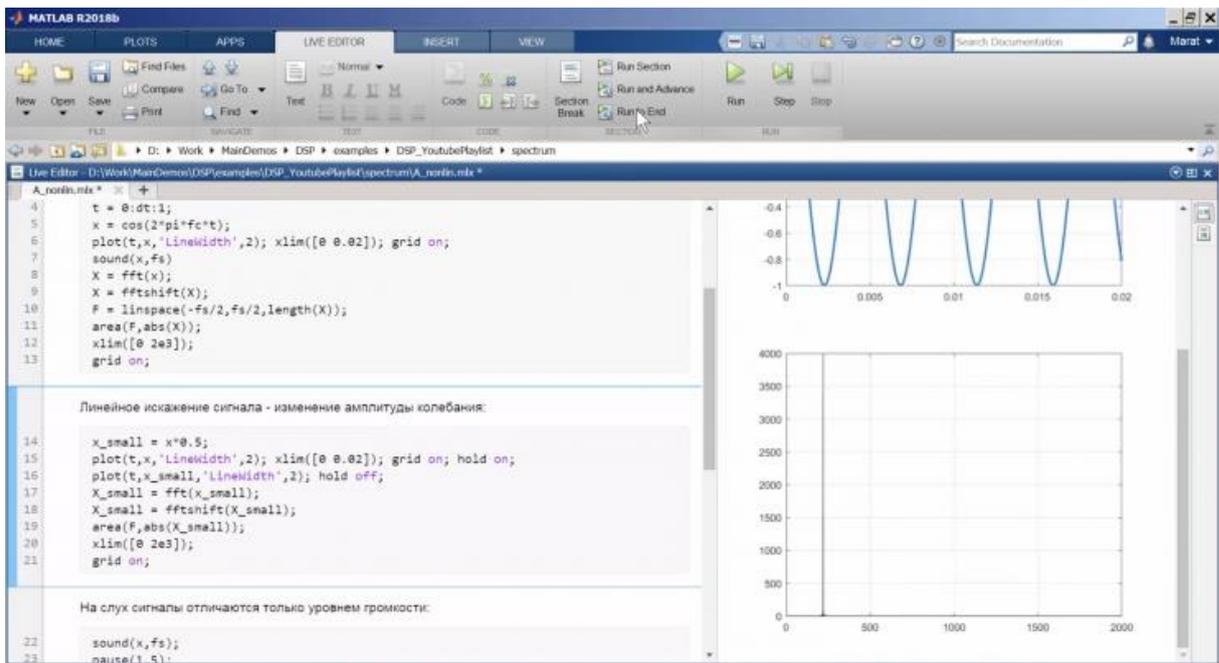


Рисунок 3.6 – Вікно моделювання лінійної системи змінить амплітуда і фаза спектральних відліків

Можемо спостерігати лише одну спектральну компоненту. Потім спробуємо виконати лінійне спотворення сигналу, тобто зміна амплітуди. Погляньмо, як ці сигнали відрізняються на слух. Ми не почули різниці в тоні, тільки почули різницю у гучності. Тепер подивимося, як виглядає нелінійне спотворення сигналу. Як приклад нелінійного спотворення ми використовуємо обмеження за рівнем. Погляньмо, що сталося зі спектром обмеженого сигналу.

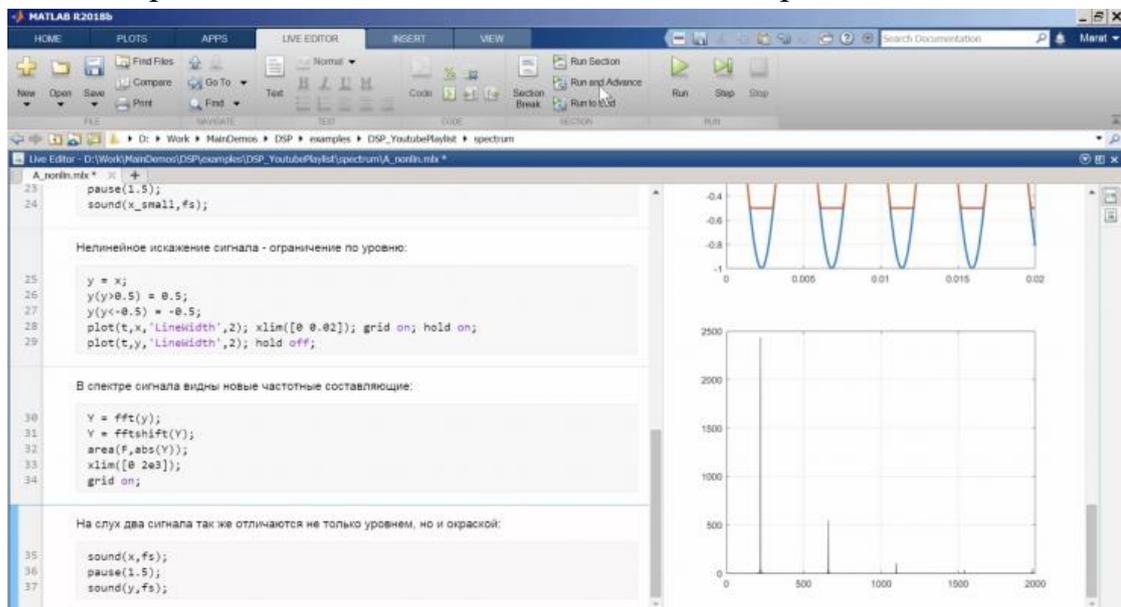


Рисунок 3.7 – Вікно моделювання нелінійної системи змінить амплітуда і фаза спектральних відліків

У ньому з'явилися додаткові частотні компоненти, гармоніки, які ми також почуємо і в офарбленні або тоні нашого сигналу.

Розглянемо віконне перетворення Фур'є, яке дозволяє нам отримати спектрограму сигналу. Віконне перетворення Фур'є (англійською short time Fourier transform, STFT) - це метод оцінки спектра сигналу, що змінюється в часі. У багатьох методах оцінки стаціонарного сигналу ми також використовували віконні функції та поділ сигналу на віконця, але після цього сигнал склеювали, усереднювали і спостерігали спектр всього сигналу. В той час, як віконне швидке перетворення Фур'є дозволяє нам отримувати шматковий спектр, який ми потім накладаємо на тимчасову вісь. Спектрограми називаються, по суті, тривимірною картиною зміни спектра в часі.

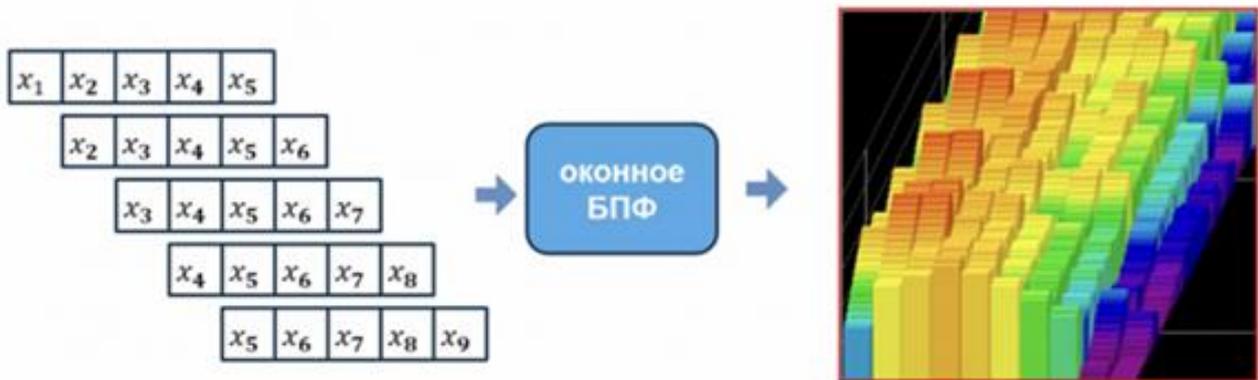


Рисунок 3.8 – Віконне перетворення Фур'є

Розглянемо приклад класичного нестационарного у часі сигналу, тобто мови. Ми спостерігатимемо спектр і спектрограму сигналу в часі за допомогою інструмента Spectrum Analyzer. Як джерело аудіоданих я використовуватиму мікрофон мого комп'ютера. Для обробки та читання я використовуватиму системні об'єкти. Окремі системні об'єкти буду використовувати для захоплення аудіопотоку з мікрофона, окремі системні об'єкти буду використовувати для побудови спектра і спектрограми. Ці об'єкти входять до складу розширення DSP System Toolbox. Коли я підготував їх, я можу почати звертатися до них в основному циклі. Цикл ми запускаємо стандартною конструкцією for, запускаємо його на виконання 10 тисяч разів, і ми спостерігатимемо в живу, як на спектрі та спектрограмі відображається моя мова. Запустимо.

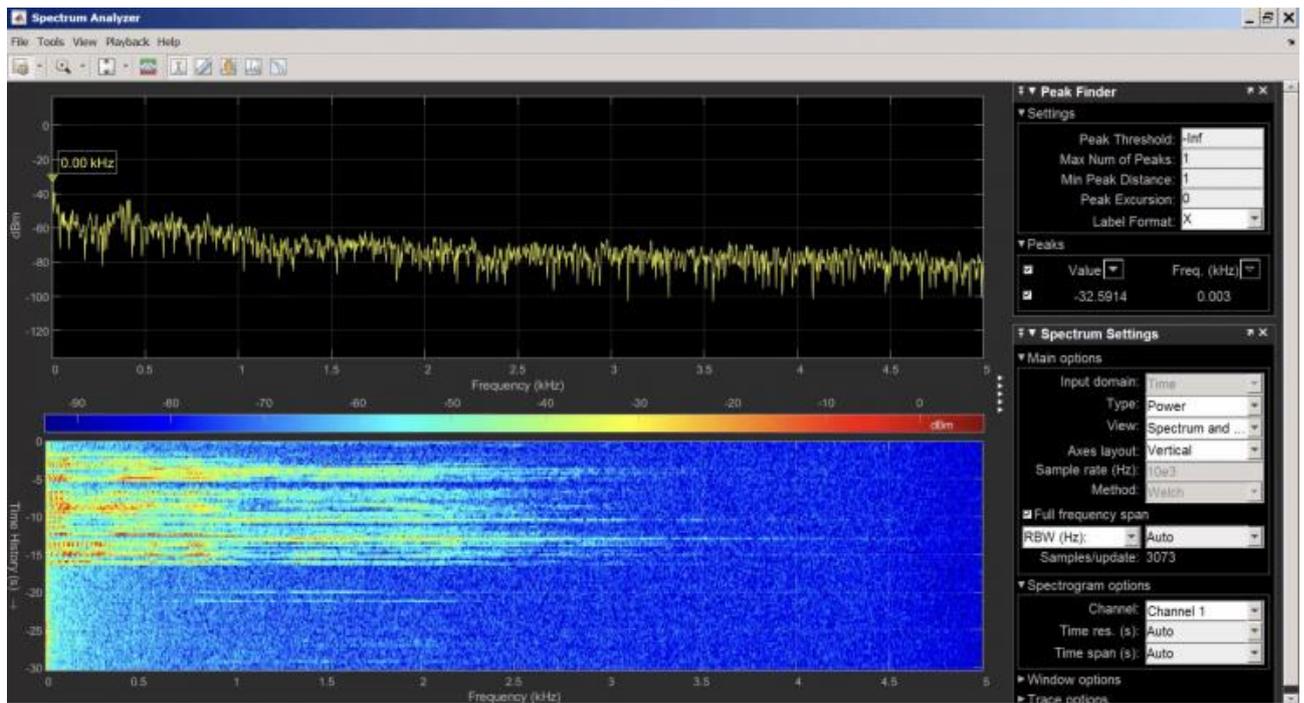


Рисунок 3.9 – Вікно моделювання в DSP System Toolbox

3.3 Висновки до розділу

В даному розділі представлено методи спектрального аналізу експериментальних даних в середовищі Matlab та в DSP System Toolbox. Спектральний аналіз - це один із методів обробки сигналів, який дозволяє охарактеризувати частотний склад вимірюваного сигналу. Розглянуті три види завдань спектрального аналізу: спектральне розкладання сигналу - подання сигналу у вигляді суми гармонійних сигналів з різними частотами; аналіз спектральних компонент сигналу з вивчення властивостей сигналу; зворотне перетворення - отримання сигналу по відомому спектральному розкладанню.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Технологічний аудит розробленого багатоканального радіотехнічного пристрою моніторингу фізичних величин (далі – розробки)

Як було підкреслено раніше, з розвитком науки і техніки пасивні бездротові датчики відіграють вирішальну роль у численних застосуваннях і привертають увагу дослідників з різних галузей. Вимоги до використання датчиків також зростають, такі як коефіцієнт якості, чутливість і простір використання датчика.

Тому метою виконаної нами магістерської кваліфікаційної роботи є покращення характеристик багатоканального радіотехнічного пристрою моніторингу фізичних величин для бездротових сенсорних мереж (IoT).

Для досягнення поставленої мети були розв'язані такі задачі: проведено аналіз бездротових сенсорів фізичних величин; розглянуто принципи вимірювання ширококутових сигналів перехідного електричного поля; розглянуто технології вимірювання електромагнітних імпульсів на основі методів високошвидкісної цифрової дискретизації з використанням FPGA; досліджено та оптимізовано конструкцію схеми формування індукованої напруги електричної дипольної антени; розглянуто методи спектрального аналізу експериментальних даних в середовищі Matlab.

В результаті розглянуто технології вимірювання електромагнітних імпульсів на основі методів високошвидкісної цифрової дискретизації з використанням FPGA та досліджено конструкцію мініатюрного датчика перехідного електричного поля на основі електрично малої монопольної антени та розробляються відповідні схеми надширококутового вимірювання.

Для проведення технологічного аудиту нашої розробки та встановлення можливості її комерційного використання було запрошено 3-х відомих і шанованих у ВНТУ експертів: д.т.н., Семенова А.О., д.т.н. професора Воловика А.Ю. та к.т.н., доцента Дудатьєва І.А..

Проведення технологічного аудиту та встановлення комерційного потенціалу розробки було зроблено за критеріями, які наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії технологічного аудиту і оцінювання комерційного потенціалу будь-якої розробки та їх бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою: 0-1-2-3-4)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція Підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає

Продовження таблиці 4.1 – Рекомендовані критерії технологічного аудиту і оцінювання комерційного потенціалу будь-якої розробки та їх бальна оцінка

	0	1	2	3	4
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

	0	1	2	3	4
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

При проведенні технологічного аудиту запрошені експерти виставили бальні оцінки за 12-ю критеріями, які зведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати технологічного аудиту нашої розробки

Критерії	Прізвище, ініціали експерта		
	Семенов А.О.	Воловик А.Ю.	Дудатьєв І.А.
	Бали, виставлені експертами:		
1	4	3	3
2	3	3	3
3	3	3	3
4	4	3	3
5	3	3	3
6	3	3	3
7	3	3	3
8	3	3	3
9	3	3	3
10	4	3	4
11	3	4	3
12	3	4	3
Сума балів	СБ ₁ = 39	СБ ₂ = 38	СБ ₃ = 37

Середньоарифметична сума балів, що їх виставили експерти, становить:

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_1^3 СБ_i}{3} = \frac{39 + 38 + 37}{3} = \frac{114}{3} = 38,00$
---	--

Керуючись рекомендаціями, наведеними в таблиці 4.3, визначимо технічний рівень та комерційний потенціал нашої розробки.

Таблиця 4.3 – Потенційні технічні рівні та комерційний потенціал розробки

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$, розрахована на основі висновків експертів	Технічний рівень та комерційний потенціал розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 48	Високий

Оскільки середньоарифметична сума балів, що їх виставили запрошені експерти, дорівнює 38,00 балів (із 48-ми балів), то можна зробити висновок, що розроблений нами багатоканальний радіотехнічний пристрій моніторингу фізичних величин має технічний рівень «вище середнього» і високу вірогідність його комерційного використання.

Це пояснюється тим, що представлена технологія локальної високошвидкісної цифрової дискретизації на основі FPGA дозволяє цифрову дискретизацію вимірюваних аналогових сигналів. Щоб вирішити поточні недоліки датчиків перехідного електричного поля було використано новий технічний підхід, заснований на високошвидкісній цифровій дискретизації на FPGA та волоконно-оптичному зв'язку. Для розробки датчика зі стійкістю до електромагнітних перешкод використано передову високошвидкісну аналого-цифрову технологію для дискретизації аналогового сигналу та оптичні волокна для передачі цифрового сигналу. Такий підхід максимізує цілісність сигналу, одночасно досягаючи стійкості до електромагнітних перешкод, і ефективно покращує чутливість та стабільність коефіцієнта датчика.

4.2 Розрахунок витрат на розроблення багатоканального радіотехнічного пристрою моніторингу фізичних величин

При виконанні магістерської кваліфікаційної роботи були зроблені такі основні витрати [42]:

4.2.1 Основна заробітна плата Z_o розробників (дослідників), інших фахівців тощо, яку можна розрахувати за формулою (4.1):

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ (грн.)}, \quad (4.1)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника, грн. У 2025 році величини окладів розробників коливалися в межах (8000...45000) грн/місяць;

T_p – число робочих днів в місяці; прийmemo $T_p = 24$ дні;

t – число робочих днів роботи розробників, дослідників, фахівців тощо.

Зроблені розрахунки основної заробітної плати розробників, дослідників, фахівців тощо зведено в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Основна заробітна плата розробників (округлено)

Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, (грн.)	Оплата за робочий день, (грн.)	Число днів роботи	Витрати на оплату праці, (грн.)	Примітка
1. Науковий керівник магістерської кваліфікаційної роботи	44500	= 1854,17 ≈ 1855	20 годин	1855/6×20 = 6183,33 ≈ 6184	При 6-ти годинном у робочому дні дня керівника та консультанта з економічної частини
2. Здобувач-магістрант	8000	= 333,33 ≈ 334	80 днів	≈ 26666	
3. Технічний консультант по сенсорам та датчикам	30000	=1250	4,5 дні	= 5625	
4. Консультант з економічної частини	19000	= 791,17 ≈ 792	1,5 години	792/6×1,5 = 198 грн	
Всього				$Z_o = 38672$ (грн.)	

Примітка. За заробітну плату магістранта прийmemo мінімальну заробітну плату в країні

4.2.2 Додаткова заробітна плата Z_d розробників розраховується за формулою:

$$Z_d = (0,1...0,12) \cdot Z_o. \quad (4.2)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$Z_d = 0,115 \times 38672 = 4447,28 \approx 4448 \text{ (грн.)}.$$

4.2.3 Нарахування на заробітну плату $НАР_{зп}$ розробників, дослідників, інших фахівців тощо розраховуються за формулою:

$$НАР_{зп} = (Z_o + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100}, \quad (4.3)$$

де $\beta = 22\%$. В 2025 році ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування.

Для нашого випадку отримаємо:

$$НАР_{зп} = (38672 + 4448) \times 0,22 = 9486,40 \approx 9487 \text{ (грн.)}.$$

4.2.4 Амортизація A основних засобів, обладнання, комп'ютерів тощо, які були використані під час виконання роботи, розраховується за формулою:

$$A = \frac{Ц \cdot H_a}{100} \cdot \frac{T}{12} \text{ (грн.)}, \quad (4.4)$$

де $Ц$ – загальна балансова вартість основних засобів, обладнання, комп'ютерів тощо, які використовувалися під час виконання роботи, грн;

H_a – річна норма амортизаційних відрахувань, %; $H_a = (2,5...25)\%$;

T – термін, використання кожного виду основних засобів, місяці.

Зроблені нами розрахунки зведемо у таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Розрахунок амортизаційних відрахувань (округлено)

Найменування основних засобів	Балансова вартість, (грн.)	Норма амортизації, %	Термін використання, місяці	Величина амортизаційних відрахувань, (грн.)
1. Основні засоби, обладнання, комп'ютери тощо	260000	22,5	3,5 (при 50% використанні)	8531,25 ≈ 8532
2. Приміщення кафедри, факультету, університету	175000	2,75	3,5 (при 50% використанні)	701,83 ≈ 702
3. Спеціалізовані дослідницькі лабораторії	280000	3,0	3,5 (при 10% використанні)	≈245
Всього				A = 9479

4.2.5 Витрати на матеріали М розраховуються за формулою:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i - \sum_1^n V_i \cdot C_v \quad (\text{грн.}), \quad (4.5)$$

де H_i – витрати матеріалу i -го найменування, кг; C_i – вартість матеріалу i -го найменування, грн/кг; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; V_i – маса відходів матеріалу i -го найменування, кг; C_v – ціна відходів матеріалу i -го найменування, грн/кг; n – кількість видів матеріалів.

4.2.6 Витрати на комплектуючі К розраховуються за формулою:

$$K = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i \quad (\text{грн.}), \quad (4.6)$$

де H_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.; C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів комплектуючих.

Загальна вартість основних матеріалів та комплектуючих, які були використані під час виконання цієї роботи, становить приблизно 10000 (грн.).

4.2.7 Витрати на силову електроенергію V_e , що була використана при виконанні цієї магістерської роботи, розраховуються за формулою:

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d}, \quad (4.7)$$

де V – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2025 р. $V \approx 6,0$ грн/кВт;

Π – установлена потужність обладнання, кВт; $\Pi = 1,85$ кВт;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин.

Приймемо, що $\Phi = 215$ годин;

K_{Π} – коефіцієнт використання потужності; $K_{\Pi} < 1 = 0,78$.

K_d – коефіцієнт корисної дії, $K_d = 0,64$.

Тоді витрати на силову електроенергію складуть:

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d} = \frac{6,0 \cdot 1,85 \cdot 215 \cdot 0,78}{0,64} \approx 2908,55 = 2909 \text{ (грн.)}.$$

4.2.8 Інші витрати $V_{ін}$ (опалення, освітлення, утримання приміщень тощо) розраховуються як (100...300)% від основної заробітної плати розробників, дослідників, інших фахівців тощо, тобто:

$$V_{ін} = K_{ін} \times Z_o = (1..3) \times Z_o. \quad (4.8)$$

Приймавши $K_{ін} = 1,75$, отримаємо:

$$V_{ін} = 1,75 \times 38672 = 67676 \text{ (грн.)}.$$

4.2.9 Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, що їх зробив безпосередньо магістрант при виконанні цієї магістерської роботи – V .

$$V = 38672 + 4448 + 9487 + 9479 + 10000 + 2909 + 67676 = 142671 \text{ (грн.)}.$$

4.2.10 Загальні витрати на остаточне завершення магістерської роботи та оформлення її результатів розраховуються за формулою:

$$ЗВ = \frac{V}{\beta}, \quad (4.9)$$

де β – коефіцієнт, який характеризує етап виконання цієї роботи на шляху до її можливого впровадження.

Оскільки наша робота потребує певного доопрацювання, то для нашого випадку доцільно прийняти, що $\beta \approx 0,8$ [42].

$$\text{Тоді: } ZB = \frac{142671}{0,8} = 178338,75 \text{ грн або приблизно 179 тисяч (грн.)}$$

Тобто загальні витрати на остаточне завершення нашої роботи та оформлення її результатів становлять приблизно 179 тисяч (грн.).

4.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації нашої розробки

Аналіз ринку подібних розробок України показує, що потенційний попит на розроблений нами багатоканальний радіотехнічний пристрій моніторингу фізичних величин оцінюється на рівні 15 тисяч одиниць у межах внутрішнього ринку України. Оскільки розроблена нами система демонструє великий потенціал у сферах моніторингу стану, виявлення несправностей та діагностики, а також у локалізації несправностей, спричинених частковими розрядами в енергетичному обладнанні, то можна стверджувати, що наша розробка поєднує конкурентну вартість, простоту виробництва та високі технічні характеристики, що робить її привабливою для комерційного впровадження. Тому прийmemo за базову величину попиту на нашу розробку кількість 10000 одиниць.

Оскільки технічні та економічні показники нашої розробки є значно кращими, ніж у аналогів, то вона буде користуватися підвищеним попитом на ринку принаймні протягом 3-х років після впровадження. Тобто наша розробка може бути впроваджена з 1 січня 2026 року, а її результати будуть виявлятися протягом 2026-го, 2027-го та 2028-го років.

Прогноз зростання попиту на нашу розробку складає по роках:

1-й рік після впровадження (2026 р.) – приблизно на $+\Delta 1000$ шт.;

2-й рік після впровадження (2027 р.) – приблизно на $+\Delta 2200$ шт.;

3-й рік після впровадження (2028 р.) – приблизно на $+\Delta 4000$ шт.

Аналіз цінового стану ринку також показав, що ціни на аналогічні (але гірші) розробки коливається в межах (2500...4500) (грн.). У зв'язку з тим, що наша розробка має значно кращі технічні і експлуатаційні характеристики, ми

можемо реалізувати її на ринку дещо дорожче, наприклад, за 3200 грн, тобто приблизно на $(3200-2500) = 700$ (грн.) дорожче.

Тоді можливе збільшення чистого прибутку $\Delta\Pi_1$, що його може отримати потенційний інвестор від комерціалізації нашої розробки становитиме [42]:

$$\Delta\Pi_1 = \sum_1^n (\Delta C_0 \cdot N + C_0 \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right), \quad (4.10)$$

де ΔC_0 – збільшення ціни нової розробки, тобто $\Delta C_0 = 3,2 - 2,5 = + 0,7$ тисяч (грн.);

N – обсяг діяльності (кількість замовників) у році до впровадження результатів розробки; $N \approx 10000$ шт.;

ΔN – покращення основного кількісного показника від впровадження результатів розробки по роках (2026, 2027 та 2028 роки) становитиме, відповідно: +1000, +2200 та +4000 шт.;

C_0 – нова ціна реалізації розробки після впровадження отриманих результатів; для нашого випадку $C_0 = 3,2$ тисяч грн;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки; $n = 3$ роки;

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість; $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати $\rho = (0,2 \dots 0,5)$; візьмемо $\rho = 0,3$;

v – ставка податку на прибуток. У 2025 році $v = 18\%$.

Тоді можлива величина зростання чистого прибутку $\Delta\Pi_1$ для потенційного інвестора протягом першого року від можливого впровадження нашої розробки (2026 р.) становитиме:

$$\Delta\Pi_1 = [0,7 \cdot 10000 + 3,2 \cdot 1000] \cdot 0,8333 \cdot 0,3 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 2090,91 \approx 2091 \text{ тисяча (грн.)}$$

Величина зростання чистого прибутку $\Delta\Pi_2$ для потенційного інвестора від можливого впровадження нашої розробки протягом другого (2027 р.) року становитиме:

$$\Delta\Pi_2 = [0,7 \cdot 10000 + 3,2 \cdot 2200] \cdot 0,8333 \cdot 0,3 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 2878,08 \approx 2879 \text{ тисяч (грн.)}$$

Величина зростання чистого прибутку $\Delta\Pi_3$ для потенційного інвестора від можливого впровадження нашої розробки протягом третього (2028 р.) року становитиме:

$$\Delta\Pi_3 = [0,7 \cdot 10000 + 3,2 \cdot 4000] \cdot 0,8333 \cdot 0,3 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 4058,84 \approx 4059 \text{ тисяч (грн.)}.$$

Приведена вартість зростання всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливої комерціалізації нашої розробки, буде:

$$\text{ПП} = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (4.11)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої роботи, (грн.);

t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої роботи, роки. Для нашого випадку $t = 3$ роки;

τ – ставка дисконтування (або рівень інфляції). Керуючись даними статистики за 2025 рік, прийємо песимістичну ставку дисконтування $\tau = 0,2$ (20,0%);

t – період часу (в роках) від моменту початку розробки до моменту отримання можливих чистих прибутків (в кожному із років).

Тоді прогнозована приведена вартість зростання всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження нашої розробки, складе:

$$\text{ПП} = \frac{2091}{(1+0,2)^2} + \frac{2879}{(1+0,2)^3} + \frac{4059}{(1+0,2)^4} \approx 1452 + 1666 + 1958 = 5076 \text{ тисяч (грн.)}.$$

Теперішня вартість інвестицій PV (або можлива вартість придбання нашої розробки інвестором для її комерціалізації): $PV = K \times V_{\text{заг}} = (1,0 \dots 5,0) \times V_{\text{заг}}$,

де $V_{\text{заг}} = 179$ тисяч (грн.) (див. підрозділ 4.1).

Для нашого випадку прийємо, що:

$$PV = (1,0 \dots 5,0) \times 179 = 5,0 \times 179 = 895 \text{ тисяч (грн.)}.$$

Абсолютний економічний ефект для потенційного інвестора від можливої комерціалізації нашої розробки за три роки (2026, 2027, 2028) складе:

$$E_{\text{абс}} = \text{ПП} - \text{PV} = 5076 - 895 = 4181 \text{ тисяча (грн.)}.$$

Тоді внутрішня дохідність $E_{\text{в}}$ вкладених інвестицій (коштів) становитиме:

$$E_{\text{в}} = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{\text{PV}}} - 1, \quad (4.12)$$

де $E_{\text{абс}}$ – абсолютний ефект вкладених інвестицій; $E_{\text{абс}} = 4181$ тисяч (грн.);

PV – теперішня вартість початкових інвестицій $\text{PV} = 895$ тисячі (грн.);

$T_{\text{ж}}$ – життєвий цикл розробки, роки.

$T_{\text{ж}} = 4$ роки (2025-й, 2026-й, 2027-й, 2028-й роки).

Для нашого випадку отримаємо:

$$E_{\text{в}} = \sqrt[4]{1 + \frac{4181}{895}} - 1 = \sqrt[4]{1 + 4,6715} - 1 = \sqrt[4]{5,6715} - 1 = 1,543 - 1 = 0,543 \approx 54,3\%.$$

Мінімальна дохідність можливо вкладених інвестицій $\tau_{\text{мін}}$, яка є допустимою, визначається за формулою:

$$\tau_{\text{мін}} = d + f, \quad (4.13)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні $d = (0,10 \dots 0,18)$. Прийmemo, що $\tau = 15\%$.

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; $f = (0,05 \dots 0,30)$.

Прийmemo, що $f = 30\%$, тобто $f = 0,3$.

Тоді для нашого випадку отримаємо:

$$\tau_{\text{мін}} = 0,15 + 0,30 = 0,45 \text{ або } \tau_{\text{мін}} = 45\%.$$

Оскільки величина $E_{\text{в}} = 54,3\% \approx \tau_{\text{мін}} = 45\%$, то потенційний інвестор у принципі може бути зацікавлений комерціалізації нашої розробки.

Термін окупності коштів, вкладених потенційним інвестором у можливу комерціалізацію нашої розробки, становитиме:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_{\text{в}}} = \frac{1}{0,543} \approx 1,84 \text{ років} < 3 \text{ років}, \quad (4.14)$$

що також свідчить про потенційну економічну доцільність комерціалізації розробленого нами багатоканального радіотехнічного пристрою моніторингу фізичних величин.

Результати виконаної економічної частини магістерської кваліфікаційної роботи зведено у таблицю:

Показники	Задані у ІЗ	Досягнуті у магістерській роботі	Висновок
1. Витрати на розробку	В межах 180 тисяч (грн.)	≈ 179 тисяч (грн.)	Досягнуто
2. Абсолютний ефект від впровадження розробки, тисяч (грн.)	В межах 4000 тисяч (грн.) (за три роки)	4181 тисяч (грн.) (при 20,0% інфляції)	Виконано
3. Внутрішня дохідність вкладених інвестицій (коштів), %	не менше 45,0%	54,3%	Виконано
4. Термін окупності інвестицій (коштів), роки	до 3-ти років	1,84 роки	Виконано

Таким чином, основні економічні показники, досягнуті нами в розробленому багатоканальному радіотехнічному пристрої моніторингу фізичних величин, визначені у індивідуальному завданні, повністю виконані.

ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено аналіз бездротових сенсорів фізичних величин. Під час проектування автоматичних та портативних систем узгодження імпедансу необхідно запропонувати ефективні рішення для підвищення зручності використання пасивних бездротових датчиків, такі як збільшення відстані зчитування та підвищення точності зчитування. Що стосується передачі даних, оскільки пасивні бездротові датчики часто покладаються на низькоенергетичні стратегії зв'язку для передачі, вони часто призводять до таких проблем, як низька швидкість передачі та обмежена дальність передачі. Тому також є проблемою підвищення ефективності передачі при дотриманні енергоспоживання датчиків. Щодо збору енергії, існують різні методи збору енергії навколишнього середовища з радіохвиль. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на дослідженні топологій бездротових сенсорних мереж та розробці нових алгоритмів для зменшення втрат енергії та мінімізації вимог до нано-пристроїв збору. Наразі ефективність рекуперації енергії під час процесу збору все ще не висока. Крім того, бездротові датчики чутливі до перешкод від навколишнього середовища, такого як метал та рідина, а ефективність збору в середовищах з низькою щільністю потужності радіочастот та низькочастотним магнітним полем є відносно складною для задоволення енергетичних потреб.

Другий розділ присвячений питанням вимірювання широкопasmових сигналів перехідного електричного поля та розгляду технології вимірювання електромагнітних імпульсів на основі методів високошвидкісної цифрової дискретизації з використанням FPGA.

Досліджено конструкцію мініатюрного датчика перехідного електричного поля на основі електрично малої монопольної антени та розробляються відповідні схеми надширокопasmового вимірювання.

Представлена технологія локальної високошвидкісної цифрової дискретизації на основі FPGA, що дозволяє цифрову дискретизацію вимірюваних аналогових сигналів. Щоб вирішити поточні недоліки датчиків перехідного електричного поля, такі як низька продуктивність на низьких частотах, вузька смуга пропускання, недостатня точність, великі розміри, нестабільні амплітудні коефіцієнти та низька системна інтеграція, використано новий технічний підхід, заснований на високошвидкісній цифровій дискретизації на FPGA та волоконно-оптичному зв'язку. Для розробки датчика зі стійкістю до електромагнітних перешкод використано передову високошвидкісну аналого-цифрову технологію для дискретизації аналогового

сигналу та оптичні волокна для передачі цифрового сигналу. Такий підхід максимізує цілісність сигналу, одночасно досягаючи стійкості до електромагнітних перешкод, і ефективно покращує чутливість та стабільність коефіцієнта датчика.

Базуючись на принципі роботи стрижневої електрично малої антени, досліджено та оптимізовано конструкцію схеми формування індукованої напруги електричної дипольної антени, розширивши аналогову смугу пропускання датчика з початкових 1 кГц до 460 МГц до надширокої смуги пропускання від постійного струму до понад 1,6 ГГц.

Також представлено методику калібрування системи вимірювання перехідного електричного поля в часовій області. Проведені експериментальні дослідження. Порівняльний аналіз роботи різних антенних датчиків показав, що розроблений датчик перевершує датчики D-dot та традиційні монопольні антенні датчики в низькочастотних сценаріях. Запропонований датчик успішно захопив форму хвилі зв'язаного електричного поля на частоті промислової частоти (50 Гц), причому її форма хвилі відповідає періоду напруги промислової частоти, відповідно до теорії квазіелектростатичної поля. Для порівняння, антена D-dot не змогла виявити цей низькочастотний сигнал через шумові перешкоди, тоді як форма хвилі традиційного датчика демонструвала значні спотворення.

Проведені дослідження демонструють, що можливості вимірювання електричного поля датчика охоплюють діапазон від стаціонарних сигналів промислової частоти до сигналів частотно-перехідного перенапруги (VFTO) та високочастотних перехідних сигналів, таких як часткові розряди. Ця вимірювальна система демонструє великий потенціал у сферах моніторингу стану, виявлення несправностей та діагностики, а також у локалізації несправностей, спричинених частковими розрядами, в енергетичному обладнанні.

В третьому розділі представлено методи спектрального аналізу експериментальних даних в середовищі Matlab та в DSP System Toolbox. Спектральний аналіз - це один із методів обробки сигналів, який дозволяє охарактеризувати частотний склад вимірюваного сигналу. Розглянуті три види завдань спектрального аналізу: спектральне розкладання сигналу - подання сигналу у вигляді суми гармонійних сигналів з різними частотами; аналіз спектральних компонент сигналу з вивчення властивостей сигналу; зворотне перетворення - отримання сигналу по відомому спектральному розкладанню.

Також в роботі проведені економічні розрахунки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang, D.; Chen, Z.; Awad, M.K.; Zhang, N.; Zhou, H.; Shen, X.S. Utility-optimal resource management and allocation algorithm for energy harvesting cognitive radio sensor networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2016, 34, 3552–3565.
2. Srbinovski, B.; Magno, M.; O’Flynn, B.; Pakrashi, V.; Popovici, E. Energy aware adaptive sampling algorithm for energy harvesting wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, Zadar, Croatia, 13–15 April 2015; pp. 1–6.
3. Kosunalp, S. A new energy prediction algorithm for energy-harvesting wireless sensor networks with Q-learning. *IEEE Access* 2016, 4, 5755–5763.
4. Kumari, K.; Sathiya, S. Structural Optimization of 2-DOF Cantilever Based Energy Harvester Using Krill-Herd Algorithm to Obtain Maximum Efficiency. In *Proceedings of the 2020 First IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA)*, Kurukshetra, India, 24–26 June 2020; pp. 1–4.
5. 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. Self-powered wireless sensor node enabled by an aerosol-deposited PZT flexible energy harvester. *Adv. Energy Mater.* 2016, 6, 1600237.
6. Buccolini, L.; Conti, M. An energy harvester interface for self-powered wireless speed sensor. *IEEE Sens. J.* 2016, 17, 1097–1104.
7. Song, H.; Kim, T.; Im, H.; Ovalle-Robles, R.; Kang, T.J.; Kim, Y.H. Flow-less and shape-conformable CNT sheet nanogenerator for self-powered motion sensor. *Nanoscale* 2016, 10, 1039.
8. Kim, S.J.; Choi, H.; Kim, Y.; We, J.H.; Shin, J.S.; Lee, H.E.; Oh, M.-W.; Lee, K.J.; Jin, B. Cho Post Ionized Defect Engineering of the Screen-Printed Bi₂Te_{2.7}Se_{0.3} Thick Film for High Performance Flexible Thermoelectric Generator. *Nano Energy* 2017, 31, 258–263.
9. Shankaregowda, S.A.; Ahmed, R.F.S.M.; Nanjegowda, C.B.; Wang, J.; Guan, S.; Puttaswamy, M.; Amini, A.; Zhang, Y.; Kong, D.; Sannathamgowda, K.; et al. Single-electrode triboelectric nanogenerator based on economical graphite coated paper for harvesting waste environmental energy. *Nano Energy* 2019, 66, 104141.
10. Fatma, B.; Gupta, S.; Chatterjee, C.; Bhunia, R.; Verma, V.; Garg, A. Triboelectric generators made of mechanically robust PVDF films as self-powered autonomous sensors for wireless transmission based remote security systems. *J. Mater. Chem. A* 2020, 8, 15023–15033.

11. Tairab, A.M.; Wang, H.; Hao, D.; Azam, A.; Ahmed, A.; Zhang, Z. A hybrid multimodal energy harvester for self-powered wireless sensors in the railway. *Energy Sustain. Dev.* 2022, 68, 150–169.
12. Xu, L.; Xuan, W.; Chen, J.; Zhang, C.; Tang, Y.; Huang, X.; Li, W.; Jin, H.; Dong, S.; Yin, W.; et al. Fully self-powered instantaneous wireless humidity sensing system based on triboelectric nanogenerator. *Nano Energy* 2021, 83, 105814.
13. Jiang, C.; Li, X.; Lian, S.W.M.; Ying, Y.; Ho, J.S.; Ping, J. Wireless technologies for energy harvesting and transmission for ambient self-powered systems. *ACS Nano* 2021, 15, 9328–9354.
14. Rahimi, R.; Brener, U.; Ochoa, M.; Ziaie, B. Flexible and transparent pH monitoring system with NFC communication for wound monitoring applications. In *Proceedings of the 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Las Vegas, NV, USA, 22–26 January 2017; pp. 125–128.
15. Deng, W.J.; Wang, L.F.; Dong, L.; Huang, Q.A. Flexible passive wireless pressure and moisture dual-parameter sensor for wound monitoring. In *Proceedings of the 2018 IEEE SENSORS*, New Delhi, India, 28–31 October 2018.
16. Charkhabi, S.; Jackson, K.J.; Beierle, A.M.; Carr, A.R.; Zellner, E.M.; Reuel, N.F. Monitoring wound health through bandages with passive LC resonant sensors. *ACS Sens.* 2020, 6, 111–122.
17. Paul, C.R.; Scully, R.C.; Steffka, M.A. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2022.
18. Giri, D.V.; Sabath, F.; Hoad, R. *High-Power Electromagnetic Effects on Electronic Systems*; Artech House: Norwood, MA, USA, 2020.
19. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від’ємним опором. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. –303с. ISBN 966-7199-99-1.
20. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 1999. – 275с. ISBN 966-7199-67-3.
21. 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.
22. 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
23. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. The Pontial of Modern Sciense. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3. Publishshed by Sciemcee Pablising.LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. –P.212-237. ISBN 978-1-9993071-3-4
 24. Andriy Semenov, Olena Semenova, Oleksandr Osadchuk, Iaroslav Osadchuk, Kostyantyn Koval, Serhii Baraban, Mariia Baraban. Pulse and Multifrequency Van der Pol Generators Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance for Infocommunication System Facilities. Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. 2021. -P.127-158. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_6
 25. Andriy Semenov, Olena Semenova, Oleksandr Osadchuk, Iaroslav Osadchuk, Serhii Baraban, Andrii Rudyk, Andrii Safonyk, Oleksandr Voznyak Van der Pol Oscillators Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance for Infocommunication System Facilities. Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. 2021. –P.43-78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_3
 26. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Pritula M.A. Devices for measuring the parameters of the magnetic field. Chapter 1. In Lvovich I.Y., Osadchuk A.V., Preobrazhenskiy A.P. et al. Erbe der europäischen wissenschaft: Ingenieurwissenschaften, Informatik, Physik und Mathematik, Medizin. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 9. Teil 1. 2022. P.4-37. ISBN 978-3-949059-50-6
 27. Osadchuk O.V. , Osadchuk V.S., Prytula M.O., Osadchuk I.O. Mathematical modeling of frequency transducers of the radio measuring device of magnetic field induction. Chapter 1. Gogo V.B., Lukin V.V., Osadchuk O.V., Petrenko A., Vorobiov L.Y.et al. Intellectual capital is the foundation of innovative development: Engineering, Computer Science, Agriculture. Monographic series«European Science». –Karlsruhe, Germany. Book 18. Part 3. 2023. –P.8-

38. ISBN 978-3-949059-81-0 DOI: 10.30890/2709-2313.2023-1 8-0
28. Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Pritula M.O. Highly sensitive radiomeasurement transducer of magnetic field induction. Chapter 2. Osadchuk O.V., Denysiuk S., Romanyuk O.N., Seliutina H.A., Shved O.V. et al. Wissenschaft und Bildung als Basis für die Modernisierung der Weltordnung: Innovative Technologien, Informatik, Sicherheitssysteme, Physik und Mathematik. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 35. Teil 1. 2024. Karlsruhe, Germany. –195 p. PP.46-71. ISBN 978-3-98924-070-4 DOI: 10.30890/2709-2313.2024-35-01
29. Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Current state of devices for measuring physical quantities. Chapter 1. Kuklin V.M., Osadchuk O.V., Novoselchuk N., Simakhina G.O., Kosolapov A. et al. Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens: Innovative Technologie, Informatik, Architektur und Bauwesen. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 41. Teil 7. 2025. ScientificWorld-NetAkhatAV Karlsruhe, Germany 2025. –282 p. PP. 10-58. ISBN 978-3-98924-103-9
30. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Ліхашорський С.В. Дослідження температурної нестабільності в активних НВЧ фільтрах та методи її зменшення // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 3, –С.127-133. DOI:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-156-3-127-133>
31. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Думенко Д.О. Аналіз доцільності використання негативного зворотнього зв'язку на змінному струмі для стабілізації параметрів транзисторних аналогів індуктивності// Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології, №2 (04) 2022. –С.83-91. DOI: 10 36994/2788-5518-2022-02-09
32. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Скощук В.К. Використання ядра NIOSIIУ багатоканальному частотомірі на FPGA для радіотехнічної системи з частотними сенсорами фізичних величин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.2023, №1. –С.137-148. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-19>
33. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Скощук В.К. Удосконалення багатоканальної радіотехнічної системи на FPGA для частотних перетворювачів фізичних величин підтримкою цифрових сенсорів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.2023, №2. –С.72-82. <https://vottp.khmnu.edu.ua/index.php/vottp/article/view/117>
34. Kasmı, C.; Esteves, J.L. IEMI threats for information security: Remote command injection on modern smartphones. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2015, 57, 1752–1755.

35. IEC 61000-4-20:2010; Electromagnetic Compatibility. Part 4-20: Testing and Measurement Techniques—Emission and Immunity Testing in Transverse Electromagnetic (TEM) Waveguides. IEC Standard: Geneva, Switzerland, 2010.
36. Peng, Z.; Liu, Y.; Wu, Q.; Liu, L.; Chen, J. An ultra-wideband time-domain antenna. In Proceedings of the 2022 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), Guangzhou, China, 27–29 November 2022; pp. 1–3.
37. Kong, X.; Xie, Y.Z.; Li, Q.; He, S.Y.; Jin, Y.B. Development of one-dimensional norm detector for nanosecond-level transient electric field measurement. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2017, 59, 1035–1040.
38. Wu, H.T.; Jiao, C.Q.; Cui, X.; Liu, X.F.; Ji, J.F. Transient electromagnetic disturbance induced on the ports of intelligent component of electronic instrument transformer due to switching operations in 500 kV GIS substations. *IEEE Access* 2017, 5, 5104–5112.
39. Wang, L.; Huang, J.; Ji, J.; Pang, F.; Yuan, Y. Measurement of transient electromagnetic coupling and interference caused by disconnector operation in substation. *Measurement* 2017, 96, 1–7.
40. He, S.; Zhang, B.; Ni, X.; Qiu, P.; Song, Y.; Song, L. Design of Nanosecond-level Transient Electric Field Sensor and its Application in HVDC Converter Station. *IEEE Lett. Electromagn. Compat. Pract. Appl.* 2023, 5, 57–61.
41. Zhang, H.; Lin, H.; He, Z.; Lu, R.; Xing, H.; Wang, B.; Wang, Z. Experimental Design for Verifying the Time-Frequency Domain Performance of Specular Single Cone Electric Field Standard Devices. *Metrol. Sci. Technol.* 2023, 67, 43–47.
42. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. / Укладачі В.О. Козловський, О.Й. Лесько, В.В. Кавецький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 42 с.

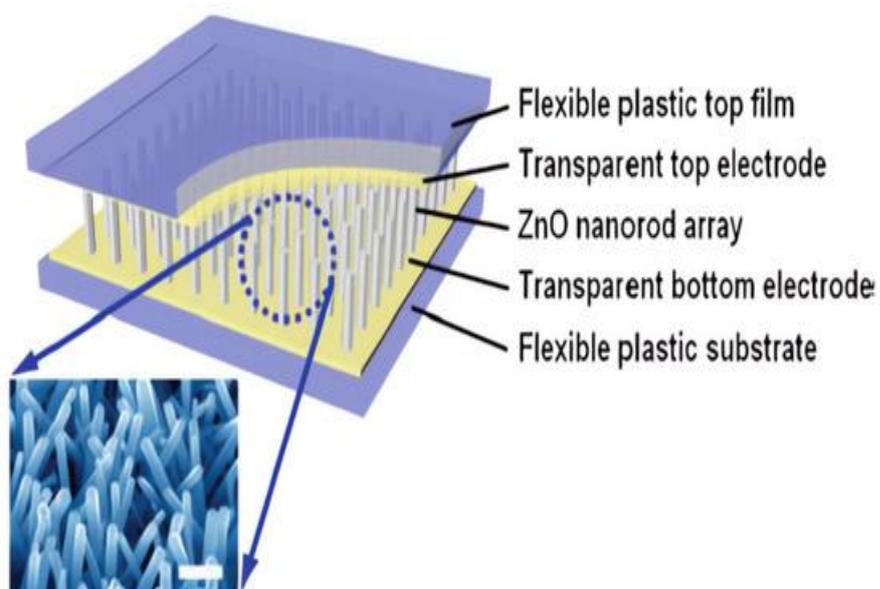


Рисунок 1 - Принципова схема гнучкого енергетичного комбайна на ранніх етапах використання

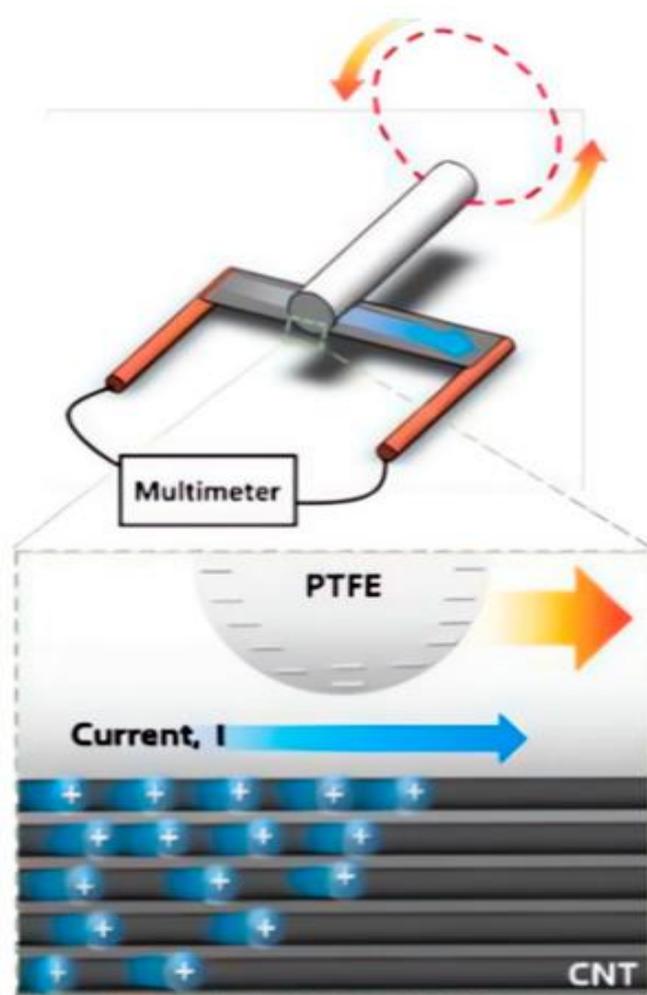


Рисунок 2 - Структура та принцип роботи наногенератора

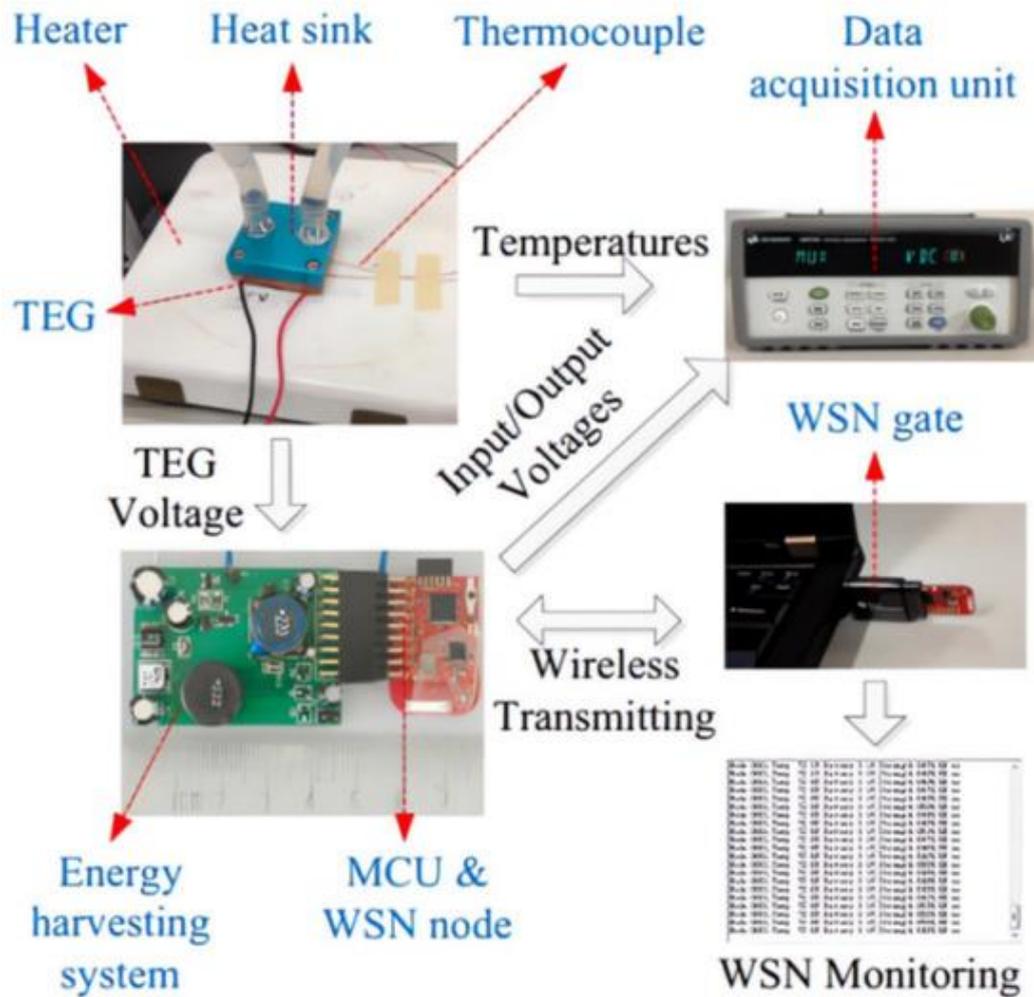


Рисунок 3 - Прототип системи збору енергії та експериментальна установка

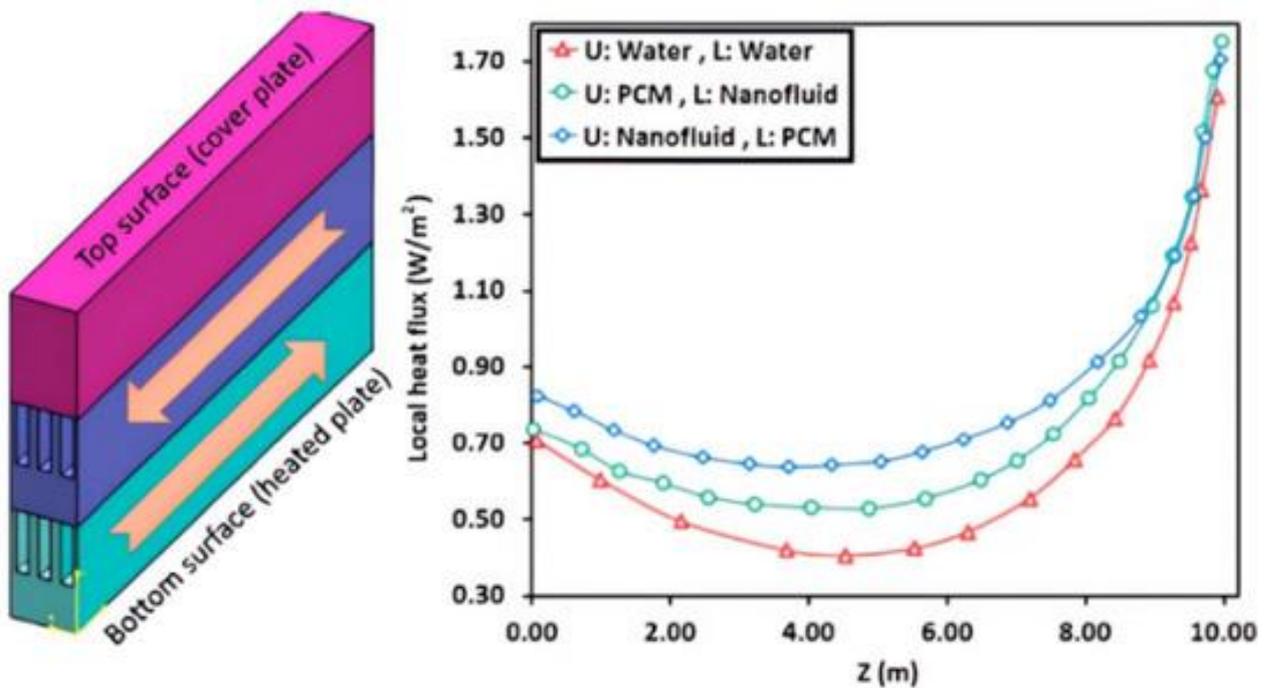


Рисунок 4 - Аналіз ребристого радіатора з PCM

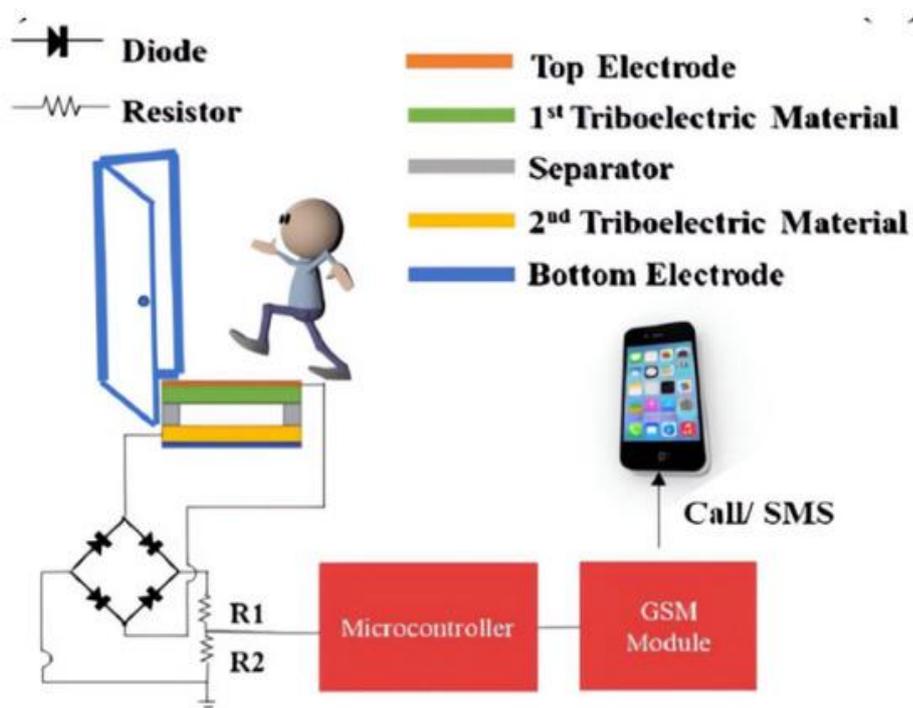


Рисунок 5 - Схема розташування датчиків із автономним живленням

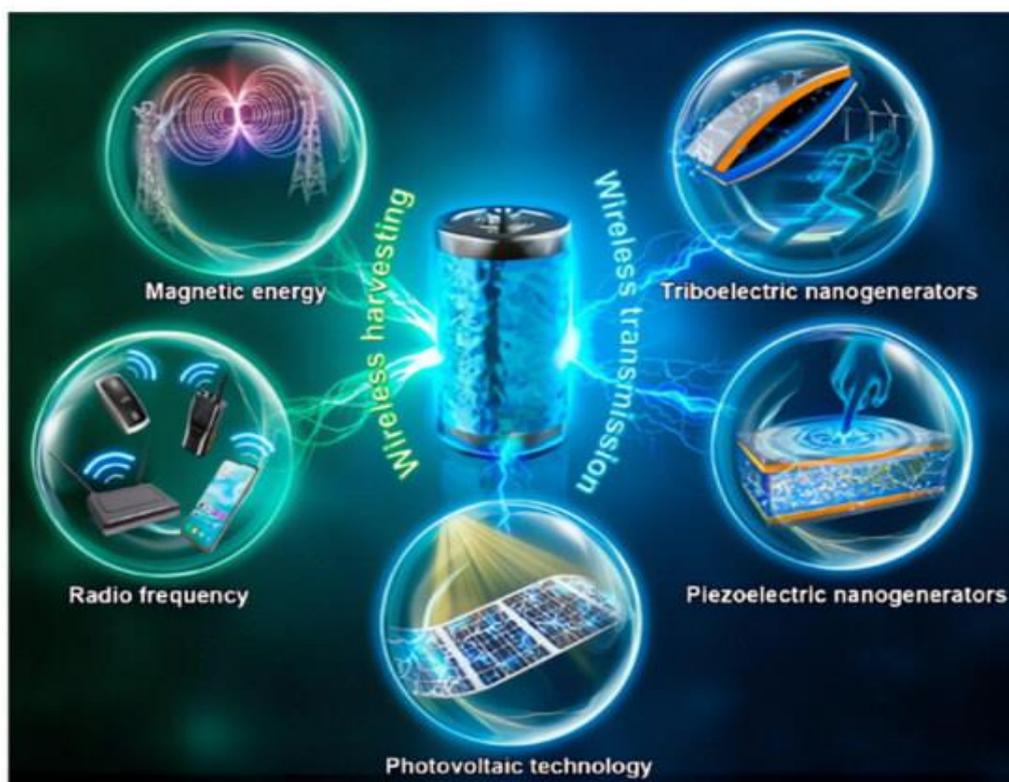


Рисунок 6 - Розробка бездротових технологій для збору або передачі енергії навколишнього середовища

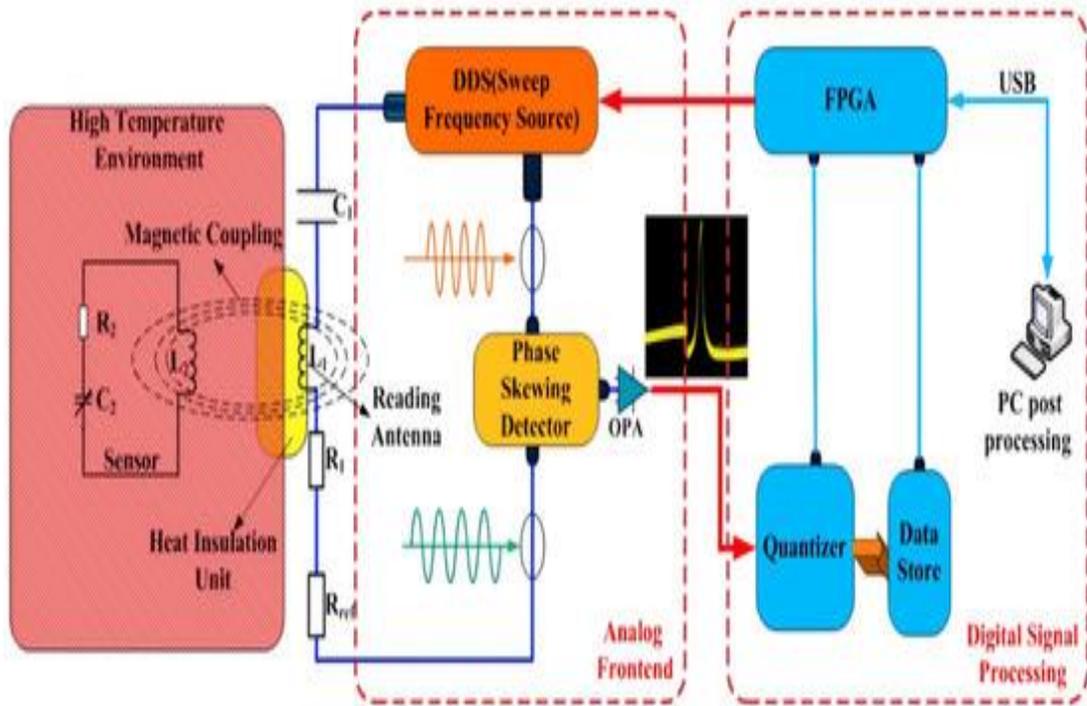


Рисунок 7 - Блок-схема бездротової вимірювальної системи

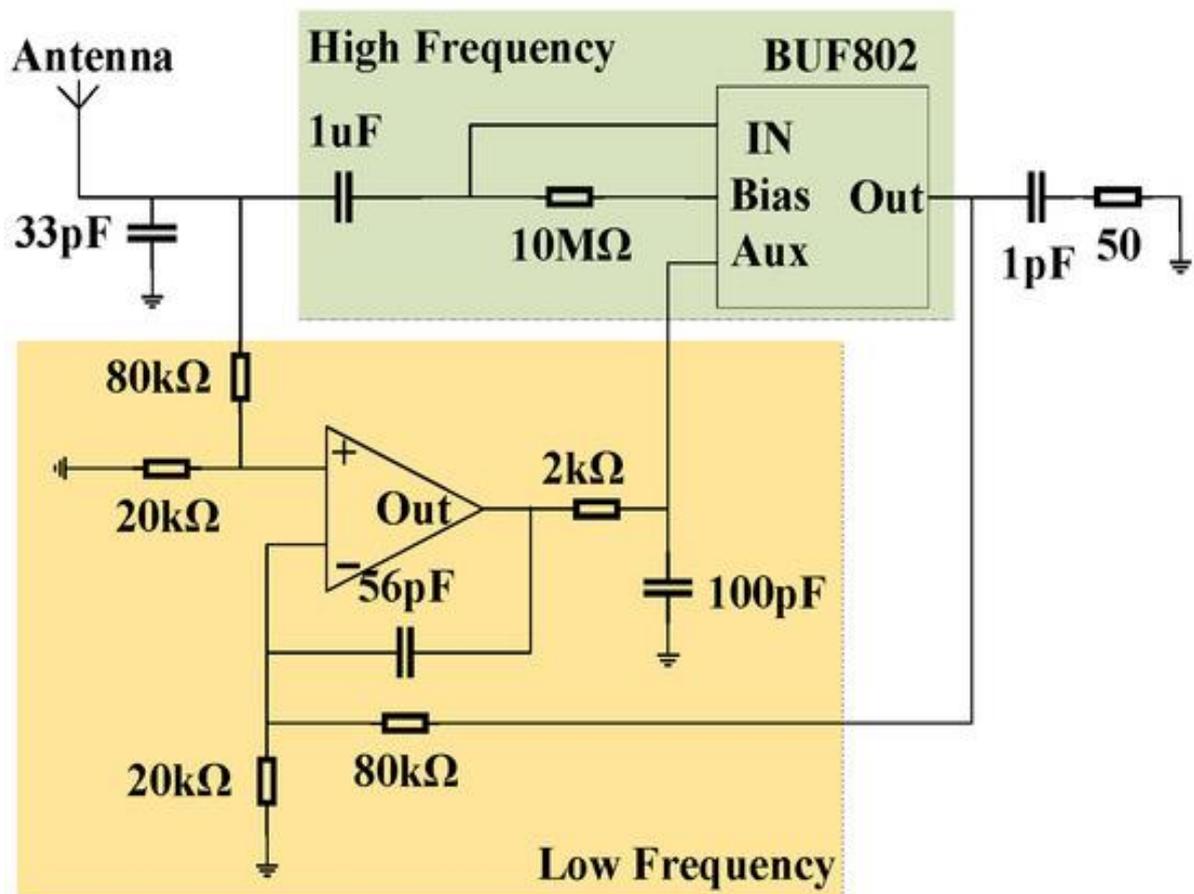


Рисунок 8 - Принципова схема схеми кондиціонування

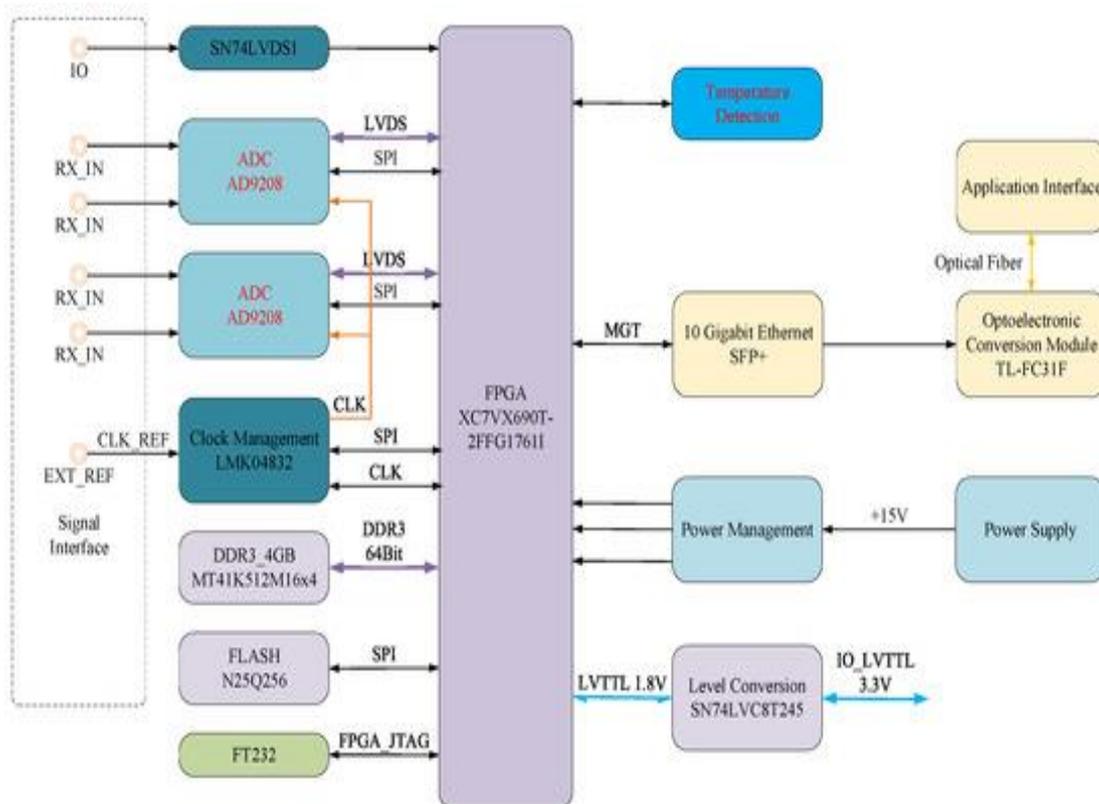


Рисунок 9 - Функціональна блок-схема високошвидкісної цифрової системи збору даних

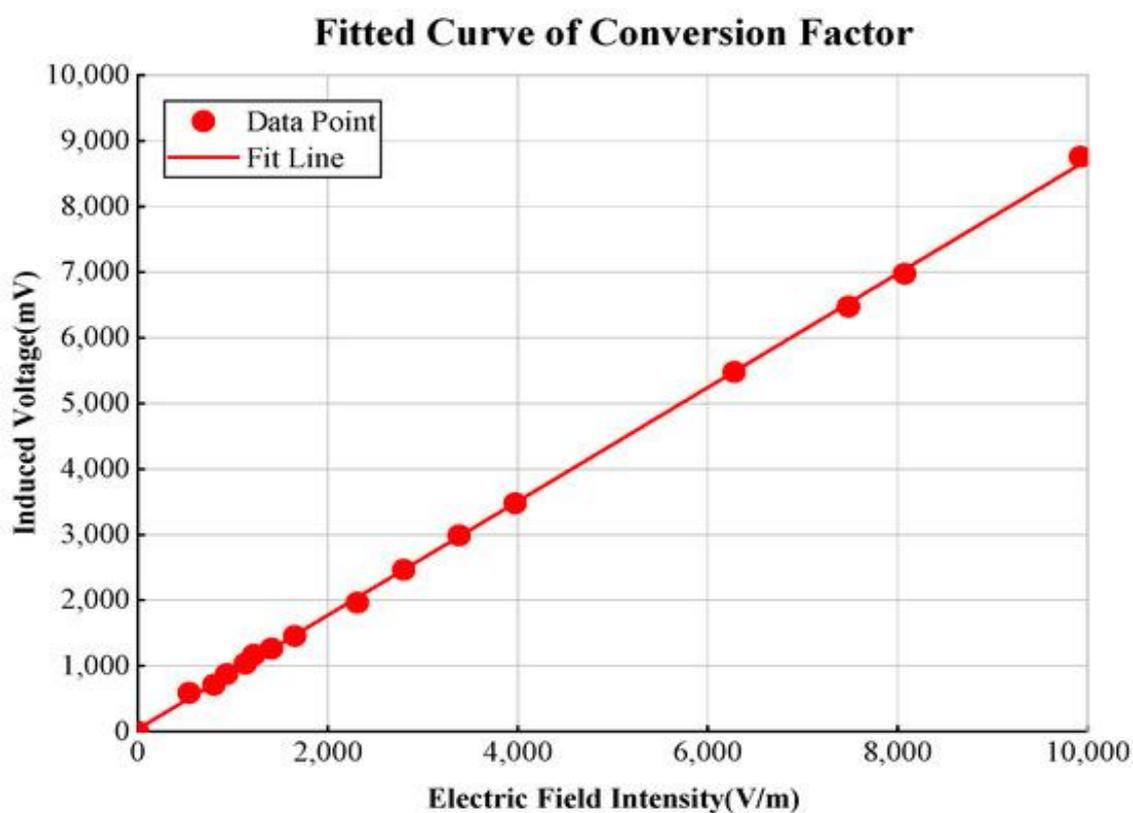


Рисунок 10 - Апроксимована крива коефіцієнта перетворення

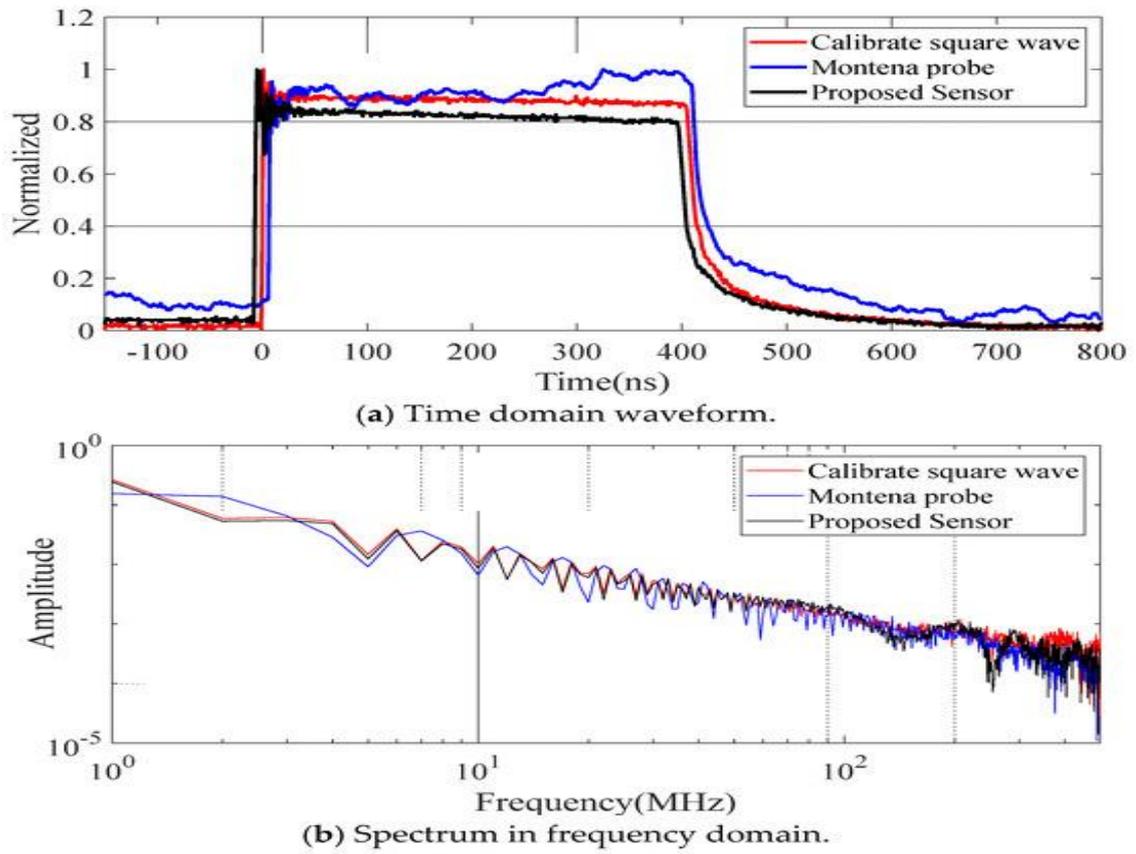


Рисунок 11 - Виміряна форма хвилі запропонованого датчика та антени D-dot у TEM-комірці

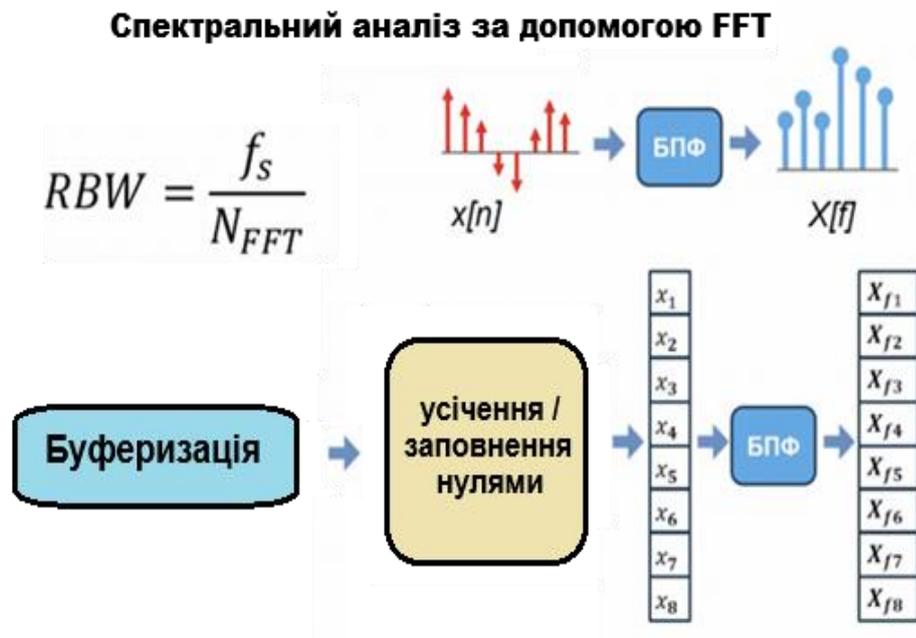


Рисунок 12 - Спектральний аналіз за допомогою ШПФ

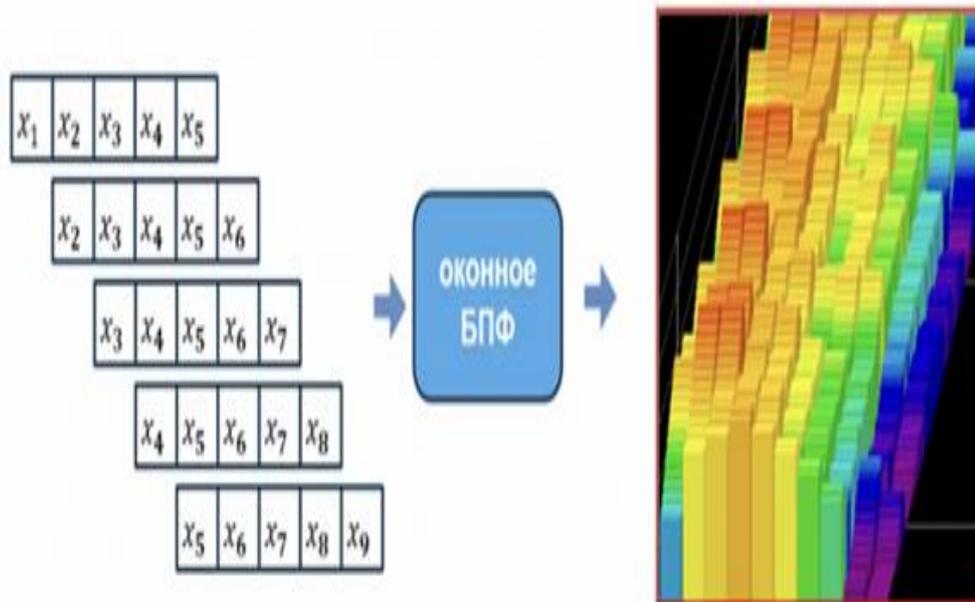


Рисунок 13 - Віконне перетворення Фур'є

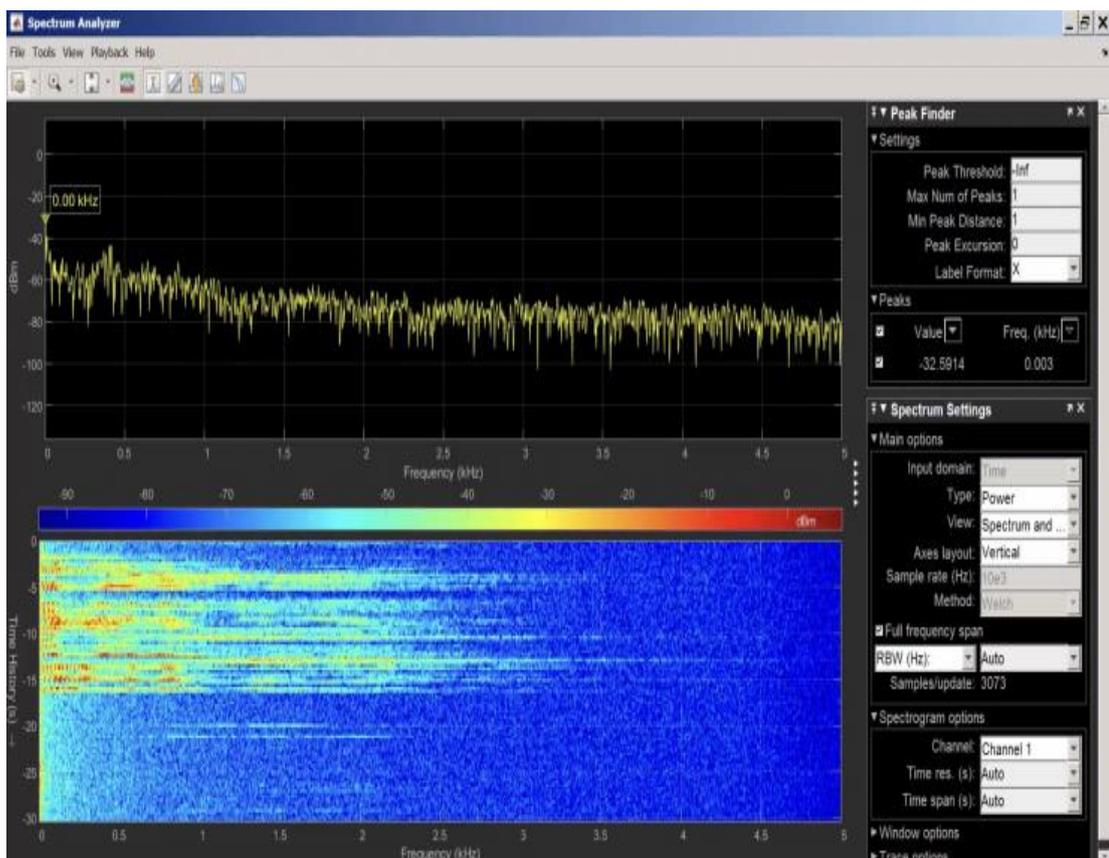


Рисунок 14 - Вікно моделювання в DSP System Toolbox

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

**БАГАТОКАНАЛЬНИЙ РАДІОТЕХНІЧНИЙ ПРИСТРІЙ МОНІТОРИНГУ
ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Багатоканальний радіотехнічний пристрій моніторингу фізичних величин для IoT систем»

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

Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 3,90%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Семенов А.О. – д.т.н., професор каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

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

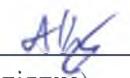

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А.О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

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

Здобувач  Кутушонок А.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)