

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Другого (магістерського) рівня

Освітній рівень

ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 17 Електроніка та телекомунікації
Шифр і назва галузі

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Шифр і назва спеціальності

ОСВІТНЯ ПРОГРАМА «Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі»
Назва освітньої програми

на тему «Інтелектуальна система збору бездротової енергії»

ДРЕКР. 024155.01.10 ПЗ

Виконав:

здубувач 2 курсу, група ЕКРМ-24-1


Підпис

Андрій ГОНЧАР

Ініціали, прізвище

Керівник: к. техн. наук, доцент


Підпис

Леся КАРПІОВА

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, професор


Підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

«08» грудня 2025 р.

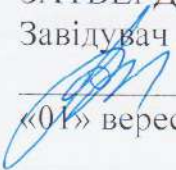
Хмельницький, 2025

Хмельницький національний університет

Факультет	<u>«Інформаційних технологій»</u>
Кафедра	<u>«Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій»</u>
Освітній рівень:	<u>Другий (магістерський)</u>
Галузь знань:	<u>17 Електроніка та телекомунікації</u>
Спеціальність:	<u>172 Електронні комунікації та радіотехніка</u>
Освітня програма:	<u>Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТМІТ

 Сергій ПІДЧЕНКО

«01» вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУГОНЧАРУ Андрію Дмитровичу

- 1 Тема роботи: «Інтелектуальна система збору бездротової енергії»
керівник роботи: КАРПОВА Леся Вікторівна, к. техн. наук, доцент
Затверджено наказом по університету від «25» серпня 2025 р. № 65
- 2 Строк подання здобувачем проєкту на кафедру _____
- 3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)
Мета роботи: розроблення архітектури інтелектуальної багаторівневої поверхні для збору електромагнітної енергії з підвищеною ефективністю, широким кутовим охопленням та стабільною роботою в змінних умовах опромінення
Об'єкт дослідження: процес збирання електромагнітної енергії поверхневими та резонансними структурами
Предмет дослідження: структурні та електрофізичні параметри метаповерхні та методи просторового сумування енергії
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
1 Сучасний стан технологій бездротового енергозбору. 2 Теоретичні основи побудови інтелектуальної збиральної системи. 3 Розробка інтелектуальної багаторівневої енергозбиральної системи. 4 Моделювання та аналіз ефективності
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):
презентаційні слайди

6 Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв


7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на дипломну роботу	07.09.2025р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на дипломну роботу	15.09.2025р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	20.10.2025р.	виконано
4.	Написання другого розділу	05.11.2025р.	виконано
5.	Написання третього розділу	20.11.2025р.	виконано
6.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до дипломну роботу	22.11.2025р.	виконано
7.	Формулювання висновків до роботи	23.11.2025р.	виконано
8.	Підготовка матеріалів для апробації	23.11.2025р.	виконано
9.	Оформлення пояснювальної записки до ДР	26.11.2025р.	виконано

Здобувач

Керівник роботи


(підпис, дата)


(підпис, дата)

Андрій ГОНЧАРЛеся КАРПОВА

АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи: «Інтелектуальна система збору бездротової енергії».

Автор роботи: ГОНЧАР Андрій Дмитрович.

Керівник роботи: к. техн. наук, доцент КАРПОВА Леся Вікторівна.

Пояснювальна записка: 83 сторінки, 14 рисунків, 2 таблиці, 35 джерел.

Графічна частина: 15 презентаційних слайдів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БЕЗДРОВОВЕ ЗБИРАННЯ ЕНЕРГІЇ; ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ЕНЕРГОЗБИРАННЯ; БАГАТОРІВНЕВА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПОВЕРХНЯ; АРХІТЕКТУРА ПРИЙМАЛЬНОЇ МЕТАПОВЕРХНІ; МЕРЕЖА ФОРМУВАННЯ ПРОМЕНЯ; РАДІОЧАСТОТНА ЕНЕРГІЯ.

Метою дипломної роботи є розроблення архітектури інтелектуальної багаторівневої поверхні для збору електромагнітної енергії з підвищеною ефективністю, широким кутовим охопленням та стабільною роботою в змінних умовах опромінення.

Об'єктом дослідження є процес збирання електромагнітної енергії поверхневими та резонансними структурами.

Предметом дослідження є структурні та електрофізичні параметри метаповерхні та методи просторового сумування енергії

У дипломній роботі розглядається концепція великомасштабного бездротового збирача електромагнітної енергії, побудованого на основі інтелектуальної багаторівневої збиральної поверхні. Запропонована архітектура посідає широке горизонтальне кутове охоплення та ефективно вертикальне акумулювання потужності завдяки ієрархічно організованим приймальним елементам. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність збору енергії та коефіцієнт підсилення системи. Проведене моделювання підтверджує працездатність і перспективність розробленої концепції для застосування в бездротовому живленні та системах відновлюваної енергетики.

ЗМІСТ

	С.
ЗМІСТ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОГО ЕНЕРГОЗБОРУ ...	12
1.1 Поточний стан досліджень бездротових систем передачі енергії ...	12
1.2 Основи поширення та перетворення електромагнітної енергії	15
1.3 Методи та системи бездротової передачі енергії	16
1.3.1 Приймальні антени, узгоджувальні мережі та випрямлячі для радіочастотного енергозбору	21
1.3.2 Приймальна антена для системи збору радіочастотної енергії ...	23
1.3.3 Схема узгодження імпедансу для системи збору радіочастотної енергії	26
1.4 Інтелектуальні поверхні та метаповерхні для збору енергії	30
1.5 Системи адаптивного керування та оптимізації енергозбору	31
1.6 Аналіз наукових підходів і виявлення невирішених завдань	32
1.7 Висновок до першого розділу	34
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ЗБИРАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	36
2.1 Основи та вимоги до багаторівневої збиральної поверхні	36
2.2 Математичні моделі відгуку елементів поверхні	37
2.3 Модель формування спрямованості та підсилення	41
2.4 Алгоритми адаптивного керування та оптимізації збору енергії ...	45
2.5 Обґрунтування архітектури та критерії ефективності	46
2.6 Висновок до другого розділу	49
3 РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ БАГАТОРІВНЕВОЇ ЕНЕРГОЗБИРАЛЬНОЇ СИСТЕМИ.....	50
3.1 Проєктування структури приймальних елементів	50

	6
3.2 Побудова моделі багаторівневої збиральної поверхні.....	55
3.3 Реалізація алгоритму керування та адаптації поверхні	56
3.4 Інтеграція в архітектуру системи бездротового живлення	61
3.5 Висновок до третього розділу	63
4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ	64
4.1 Етапи моделювання та параметри експерименту.....	64
4.2 Діаграми спрямованості підрешіток різних рівнів.....	67
4.3 Аналіз ефективності за різних умов і кутів опромінення.....	70
4.4 Порівняння з існуючими методами та системами.....	73
4.5 Аналіз енергетичних характеристик та підсилення	74
4.6 Обговорення результатів, обмеження та перспективи	76
4.7 Висновок до четвертого розділу	78
ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	81
ДОДАТКИ.....	84

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

WPT	– Бездротова передача енергії (Wireless Power Transfer)
RF	– Радіочастотний діапазон (Radio Frequency)
IRCS	– Інтелектуальна багаторівнева збиральна поверхня (Intelligent Recursive Collecting Surface)
IoT	– Інтернет речей (Internet of Things)
ACR	– Активна збиральна решітка (Active Collecting Array)
DC	– Постійний струм (Direct Current)
HFSS	– Система високочастотного моделювання (High Frequency Structure Simulator)
FDTD	– Метод кінцевих різниць у часі (Finite-Difference Time-Domain)
MoM	– Метод моментів (Method of Moments)
ISM	– Промисловий, науковий і медичний діапазон частот (Industrial, Scientific and Medical Band)
SNR	– Відношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio)
UWB	– Надширокосмуговий сигнал (Ultra-Wideband)
KCX	– Коефіцієнт стоячої хвилі напруги
LPF	– Низькочастотний фільтр (Low-Pass Filter)
AI	– Штучний інтелект (Artificial Intelligence)
ML	– Машинне навчання (Machine Learning)
DC–RF	– Перетворення постійної напруги у радіочастотний сигнал (DC-to-RF Conversion)
RF–DC	– Перетворення радіочастотної енергії у постійну напругу (RF-to-DC Conversion)

ВСТУП

Сучасний розвиток електроніки, бездротових систем зв'язку та Інтернету речей (IoT) зумовлює постійне зростання потреби у стабільних і довготривалих джерелах живлення для великої кількості малопотужних пристроїв. Традиційні батарейні системи мають обмежений термін служби, потребують періодичної заміни або підзарядки, що ускладнює їх застосування у віддалених, мобільних або мікромасштабних пристроях. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є збирання енергії з навколишнього середовища – процес перетворення енергії, наявної у навколишньому середовищі, у корисну електричну енергію для живлення електронних систем.

Серед можливих джерел – сонячна, вітрова, теплова, геотермальна, радіочастотна та електромагнітна енергія. Особливий науковий інтерес становить збирання електромагнітної (радіочастотної та мікрохвильової) енергії, оскільки вона доступна практично скрізь завдяки наявності численних випромінювачів, таких як базові станції стільникового зв'язку (4G/5G/6G), точки доступу Wi-Fi, передавачі FM-радіо, системи GPS, телевізійні передавачі тощо. Збирання цієї енергії реалізується за допомогою приймально-випрямляючих модулів, які перетворюють високочастотну електромагнітну хвилю на постійний електричний струм.

Попри значні досягнення у сфері приймально-випрямляючих модулів і багатосмугових антенних структур, існує низка технічних обмежень, що стримують ефективне використання таких систем:

- вузьке кутове охоплення приймання сигналу через обмежену спрямованість антен;
- втрати потужності під час поєднання сигналів від множини елементів;
- складність оптимізації фазових і амплітудних характеристик при багатоканальному прийомі;

- зниження ефективності перетворення енергії при зміні напрямку або інтенсивності вхідного випромінювання.

Таким чином, актуальним завданням є розроблення архітектури багаторівневої бездротової системи енергії електромагнітних хвиль, здатної забезпечити широке просторове охоплення, високу спрямованість і підвищену ефективність прийому. З цією метою у даній роботі пропонується використання інтелектуальної багаторівневої збиральної поверхні (IRCS), яка поєднує принципи ієрархічної побудови та формування променя за типом водозбірного басейну. Такий підхід дозволяє акумулювати енергію з кількох напрямків одночасно, підвищуючи щільність зібраної потужності й загальну енергоефективність системи.

Розв'язання цієї проблеми має значну наукову та практичну цінність, оскільки забезпечує фундамент для створення енергоавтономних бездротових сенсорних мереж, розумних пристроїв, безпілотних апаратів та інтелектуальних енергомереж. Таким чином, запропонований підхід сприяє розвитку концепції «зелених» технологій та сталих систем живлення майбутнього.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розроблення, теоретичне обґрунтування та дослідження інтелектуальної багаторівневої збиральної поверхні для підвищено ефективного бездротового збирання електромагнітної енергії в умовах змінних просторових і частотних характеристик середовища.

Основні завдання, що вирішуються у даній кваліфікаційній роботі, включають:

- аналіз фізичних принципів поширення та перетворення електромагнітної енергії;
- огляд і критичне порівняння існуючих архітектур бездротових енергозбирачів;
- формування вимог до багаторівневої збиральної поверхні та обґрунтування її структури;
- розробку моделі формування діаграми спрямованості та оцінки коефіцієнта підсилення;

- створення архітектури інтелектуального керування параметрами приймальної поверхні;
- проведення моделювання ефективності системи при різних кутах та рівнях опромінення;
- аналіз вихідних характеристик та визначення оптимальних структурних параметрів.

Актуальність роботи полягає в тому, що сучасні бездротові сенсорні мережі, IoT-пристрої, автономні модулі моніторингу та мікросистеми потребують стабільних, довготривалих і безобслугових джерел живлення. Зростання щільності випромінювачів у навколишньому середовищі відкриває можливість ефективного збирання електромагнітної енергії, але для цього необхідні нові архітектури приймальних структур із широким просторовим охопленням і високою ефективністю перетворення. Багаторівневі інтелектуальні збиральні поверхні здатні забезпечити ці вимоги, що робить тему роботи актуальною та важливою для сучасних технологій.

У роботі розглядається комплексний підхід до побудови інтелектуальної збиральної поверхні, що включає архітектуру приймальних елементів, ієрархічну систему формування спрямованості, моделі імпедансного узгодження, алгоритми адаптивного керування та механізми підвищення ефективності перетворення RF-енергії на електричну.

Метод дослідження, використовуваний у даній роботі, базується на поєднанні методів електродинамічного моделювання, матричного опису антенних решіток, аналізу еквівалентних схем приймально-випрямляючих модулів, чисельних методів (FDTD, MoM), а також алгоритмів оптимізації і систем адаптивного керування. Дослідження проводиться з використанням програмного моделювання та аналітичних розрахунків.

Об'єктом дослідження є процес бездротового збирання електромагнітної енергії в радіочастотному та мікрохвильовому діапазонах.

Предметом дослідження є багаторівнева інтелектуальна збиральна поверхня, її структура, принципи формування спрямованості та методи підвищення ефективності поглинання та перетворення енергії.

Наукова новизна роботи полягає в розробленні концепції багаторівневої збиральної поверхні з інтелектуальним керуванням, яка забезпечує адаптивне просторове переформування діаграми спрямованості, підвищення ефективної площі поглинання та покращення коефіцієнта перетворення RF-енергії за рахунок ієрархічної побудови та застосування методів алгоритмічної адаптації.

Практичне значення дипломної роботи полягає у можливості застосування запропонованої структури в автономних бездротових сенсорних мережах, IoT-модулях, системах архітектурної інтеграції, енергоавтономних вимірювальних комплексах, а також у пристроях моніторингу інфраструктури, де доступ до традиційних джерел живлення є обмеженим.

Отримані результати дослідження можуть бути використані для створення та вдосконалення широкого спектра сучасних бездротових енергетичних рішень. Зокрема, вони дають можливість проектувати високоефективні енергозбиральні системи нового покоління, здатні працювати в багатодіапазонних та змінних умовах опромінення. Запропоновані підходи можуть слугувати основою для розробки інтелектуальних метаповерхонь, призначених для живлення мікропристроїв та елементів Інтернету речей. Крім того, результати можуть бути застосовані у створенні автономних бездротових сенсорних мереж, що не потребують регулярної заміни джерел живлення. Отримані дані також сприятимуть оптимізації існуючих антенних систем з метою підвищення їх здатності до поглинання та перетворення електромагнітної енергії.

За темою дипломної роботи прийнята до друку одна стаття у науковому журналі "Вісник Хмельницького національного університету" № 6 за 2025 р., серія "Технічні науки", який включено до наукометричних баз (Index Copernicus, Google Scholar)

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОГО ЕНЕРГОЗБОРУ

1.1 Поточний стан досліджень бездротових систем передачі енергії

Упродовж останнього десятиліття тема збору енергії з навколишнього середовища, зокрема радіочастотного (RF) енергозбору, стала одним із інтенсивно розвинутих напрямків у радіо- та енергетичній інженерії. Зростання щільності бездротових передавачів (базові станції, точки доступу Wi-Fi, телевізійні і радіопередавачі, IoT-вузли) разом із впровадженням 4G/5G і підготовкою до 6G створюють технічну можливість використовувати навколишнє електромагнітне поле як джерело енергії для малопотужних пристроїв. Нижче стисло викладено ключові напрямки та досягнення сучасних досліджень, а також існуючі обмеження й нагальні проблеми.

1. Архітектури систем RF-енергозбору (rectenna-системи)

Класична архітектура ректенни включає: антену (приймальний елемент), схему узгодження імпедансів (matching network), випрямляч / множник напруги (rectifier / voltage multiplier) та блок зберігання і управління енергією (мастер-PMU, буферна ємність, зарядний контролер). У дослідженнях відпрацьовані численні варіанти антенної частини (монопольні, патч-антени, диполі, слот-конструкції, фрактальні та широкосмугові рішення), а також конфігурації багатосмугових і масивних ректенн для підвищення сумарного зібраного потоку.

2. Антенні рішення та широкосмугові структури

Щоб охопити різні джерела RF (FM, DTV, GSM, LTE, Wi-Fi, 5G тощо), активно розвиваються багатосмугові та широкосмугові антени: фрактальні структури, мульти-петльові патч-масиви, розтяжні/гнучкі ректенни для носимих пристроїв. Паралельно досліджуються поверхневі решітки і наднаправлені решітки (arrays) для фокусування потоку енергії та підвищення коефіцієнта збору в заданому напрямку.

3. Узгодження імпедансів і адаптивні matching-мережі

Однією з основних причин втрат є невідповідність імпедансів антени та випрямляча в різних умовах (частота, рівень сигналу, навантаження). Сучасні підходи включають адаптивні matching-схеми з варикапами, RF-переключачами, MEMS та цифровим керуванням для динамічного підстроювання під робочі умови. Це дозволяє підвищити потужність, що подається на випрямляч, особливо при змінних частотах і низьких рівнях сигналу.

4. Випрямлячі та схеми множення напруги

Традиційні рішення – каскадні множники типу Cockcroft-Walton і Greinacher з діодами Schottky – залишаються поширеними завдяки простоті й надійності. Однак активно розвиваються: синхронні випрямлячі, низькопорогові діодні топології, діодні модифікації з тунельними/мезоелектронними структурами, а також мікрохвильові CMOS-рішення. Увага зосереджена на підвищенні ефективності при дуже малих вхідних напругах і струмах (режим $nW-\mu W$), зниженні падаючих напруг на переходах і мінімізації паразитних ємностей.

5. Системи управління енергією та інтерфейси (PMU, MPPT)

Питання перетворення й накопичення енергії вирішуються за допомогою спеціалізованих блоків – power management units (PMU) та електронних перетворювачів з підтримкою технік максимальної передачі потужності (MPPT). У сучасних розробках PMU оптимізують час заряджання/розряджання, мінімізують витрати, інтегрують алгоритми адаптивного живлення для живлення періодичних або режимних навантажень (передача даних у сплесках).

6. Гібридні підходи та мультиджерела

Через обмежену потужність окремих RF-джерел актуально поєднувати RF-ЕН з іншими видами збору енергії (сонячні панелі, термоелектричні генератори, віброенергія). Гібридні системи дозволяють підвищити надійність та середню доступну потужність, проте вимагають складнішої системи керування та інтеграції.

7. Матеріали, конструкції та гнучкі рішення

Розвиваються гнучкі і розтяжні антенні підкладки для носимих пристроїв, а також використання нових матеріалів (метаматеріали, тонкоплівкові провідники) для підвищення коефіцієнта перетворення та формування спрямованості.

8. Інтелектуальні та адаптивні рішення

Останнім часом дослідники звертаються до методів керування на основі алгоритмів машинного навчання і нейромереж для адаптивного налаштування системи в реальному часі: вибір оптимального режиму узгодження, прогнозування доступної потужності, адаптивне планування зарядних циклів тощо.

9. Практичні обмеження та виклики

Незважаючи на помітний прогрес, ключові технічні обмеження залишаються: дуже низька щільність доступної RF-потужності у більшості реальних середовищ (тому вихідні потужності часто на рівні нВт–мкВт), ефективність випрямлення при малих вхідних рівнях, втрати в узгоджувальних ланцюгах, обмеження розмірів і ваги для мобільних застосувань, а також необхідність цілісної інтеграції з енергоменеджментом і накопиченням.

10. Перспективні напрямки досліджень

На даному етапі перспективними вважаються: розробка надчутливих випрямлячів і синхронних схем низької напруги; впровадження адаптивних matching-мереж з цифровим керуванням; застосування решіток та масивних ректенн з енергетичним бімформінгом; інтеграція гібридних джерел та інтелектуального PMU із алгоритмами прогнозування; використання метаматеріалів і тонких плівок для мініатюризації та підвищення ефективності.

Підсумовуючи, сучасний стан досліджень у галузі бездротового збору енергії демонструє значний прогрес у компонентах ректенни (антена, узгодження, випрямляч, PMU), але реальна ефективність системи в робочих

умовах залежить від успішного поєднання цих елементів та застосування інтелектуальних адаптивних рішень для подолання фундаментальних обмежень низького рівня вхідної потужності.

1.2 Основи поширення та перетворення електромагнітної енергії

Бездротовий енергозбір ґрунтується на фундаментальних властивостях електромагнітного поля переносити енергію та передавати її матеріальним структурам, здатним до її поглинання й перетворення. Електромагнітні хвилі, що виникають внаслідок взаємодії змінних електричного та магнітного полів, описуються системою рівнянь Максвелла, які визначають характер їх поширення, відбиття, поглинання й дифракції. Енергія, яку переносить хвиля, передається у вигляді електромагнітного потоку, величина якого характеризується вектором Пойтінга. Цей вектор визначає густину потужності та напрямок її перенесення в просторі, що є ключовим для оцінки потенціалу збору енергії в конкретних умовах.

Особливості поширення хвиль істотно залежать від властивостей середовища, через яке вони проходять. Діелектрична проникність, провідність, товщина та структура матеріалів, наявність відбиттів і багатопроменевих компонент – усе це впливає на рівень енергетичного потоку, що досягає приймального елемента. У практичних системах бездротового енергозбору втрати виникають через відбиття на межах середовищ, поглинання у матеріалах, розсіювання на нерівностях та дифракцію на перешкодах. У міському та промисловому середовищі важливими чинниками стають також багатопроменевість і ефект стоячих хвиль, які можуть як збільшувати, так і зменшувати доступну потужність залежно від розташування приймача.

Для перетворення електромагнітної енергії у електричну використовуються спеціалізовані приймальні антенно-випрямляючі структури – ректени та ректики. Антена забезпечує захоплення хвилі та

перетворення її у високочастотний електричний сигнал, а ректичний каскад виконує випрямлення за допомогою нелінійних елементів — здебільшого швидкодіючих Шотткі-діодів, які мають низьку напругу відкриття та високу частотну швидкодію. Після випрямлення сигнал подається на фільтр і накопичувач енергії (конденсатор або суперконденсатор), що дозволяє стабілізувати вихідну напругу й забезпечити живлення малопотужних електронних компонентів.

Таким чином, фізичні принципи бездротового енергозбору охоплюють такі ключові етапи:

- поширення та згасання електромагнітних хвиль у вільному просторі або складному радіооточенні;
- взаємодію хвилі з приймальними антенно-метаматеріальними структурами, включно з ефективною апертурою та коефіцієнтом корисної дії антени;
- випрямлення високочастотного сигналу за допомогою нелінійних елементів і оптимізованих ректичних схем;
- фільтрацію, згладжування та акумулювання енергії, що формує стабільне джерело живлення для автономних пристроїв.

У сукупності ці процеси визначають загальну ефективність системи енергозбору та її придатність для використання у реальних умовах – від IoT-мереж і сенсорних вузлів до енергетичного забезпечення інтегрованих смарт-систем.

1.3 Методи та системи бездротової передачі енергії

Сучасні методи бездротової передачі енергії поділяються на дві основні групи: ближньодіючі індуктивні та резонансні методи, а також дальньодіючі технології, що використовують електромагнітне випромінювання. Кожна з них має власні технічні особливості, ефективність та сфери застосування, що

визначає актуальність їх порівняння в контексті розробки систем енергозбирання.

Ближньодіючі технології застосовуються переважно там, де передавальний і приймальний елементи розташовані на відстані від кількох міліметрів до кількох десятків сантиметрів. Найпоширенішим методом є індуктивна передача (IPT), у якій енергія переноситься через магнітне поле між двома котушками. Такий принцип лежить в основі бездротової зарядки персональних пристроїв, забезпечуючи високий коефіцієнт корисної дії, але різко втрачаючи ефективність при збільшенні відстані або зміщенні котушок. Іншим варіантом є магнітний резонанс (MR-WPT), який використовує котушки, налаштовані на однакову резонансну частоту. Це дозволяє передавати енергію на більшу відстань, зберігаючи стабільність та порівняно високий ККД навіть при слабкому взаємному орієнтуванні елементів. Натомість електростатичне спряження, що базується на взаємодії електричних полів, використовується рідше через низьку ефективність та помітні втрати.

Дальнодіючі технології спрямовані на передачу енергії на метри, десятки метрів або навіть кілометри. Одним із ключових напрямів є мікрохвильові системи (RF-WPT), де енергія переноситься у формі високонаправленого електромагнітного променя, що генерується антенними решітками. Такі технології широко застосовуються для живлення сенсорних модулів, IoT-пристроїв, роботизованих систем та інших низькопотужних платформ. Оптичні системи лазерної передачі енергії забезпечують ще більшу щільність потоку, дозволяючи ефективно живити віддалені об'єкти за умови прямої видимості, проте потребують складних систем безпеки та точного наведення променя. Окремий клас складають системи радіочастотного енергозбору (RFEH), які не вимагають спеціальних передавачів, оскільки використовують фонове випромінювання від базових станцій, Wi-Fi роутерів чи телерадіопередавачів. Такі системи зазвичай забезпечують мікроватний рівень потужності, але є надзвичайно ефективними для автономних сенсорів і енергоефективних пристроїв.

На рисунку 1.1 наведено приклади застосування бездротових систем збору енергії у різних галузях [3].



Рисунок 1.1 – Застосування бездротового збору енергії

На рисунку 1.1 представлено широкий спектр напрямів використання систем енергозбирання у побутових, промислових та інженерних комплексах. Схема ілюструє центральний елемент – «Застосування систем енергозбирання», від якого радіально відходять гілки до ключових сфер, де технології бездротової передачі та збору енергії дозволяють вирішувати завдання енергоавтономності, зменшення споживання від мережі та підвищення надійності роботи обладнання.

Одним із найбільш поширених напрямів є автономне живлення побутових електронних приладів, де низькопотужні системи збору енергії забезпечують роботу сенсорів руху, термометрів, охоронних датчиків та пристроїв «розумного дому». Завдяки цьому можливо мінімізувати необхідність заміни батарей і забезпечити тривалу експлуатацію пристроїв у важкодоступних місцях.

Перспективним є також використання технологій бездротового енергозбору для заряджання електричного транспорту, зокрема електромобілів та легких автономних платформ. У цьому випадку

застосовуються високочастотні або магнітнорезонансні WPT-системи, здатні забезпечувати передачу енергії без використання дротових з'єднань. Подібні рішення активно розглядаються у проєктах інтелектуальної транспортної інфраструктури майбутнього.

Значний інтерес викликає забезпечення бездротовою енергією пристроїв Інтернету речей (IoT). Більшість IoT-модулів характеризуються низьким енергоспоживанням, тому навіть незначний рівень зібраної радіочастотної енергії дозволяє подовжити термін їх автономної роботи або повністю відмовитися від батарейних елементів. Це особливо важливо для великих розподілених мереж: систем моніторингу навколишнього середовища, телекомунікаційної інфраструктури, логістики та смарт-міст.

Окрема група застосувань – портативні електронні пристрої, серед яких смарт-годинники, фітнес-браслети, медичні сенсори та інші носимі девайси. У таких системах ключову роль відіграє стабільність напруги та ефективність перетворення сигналів низького рівня. Застосування ректифікаційних структур з діодами малої напруги відкривання забезпечує можливість енергоживлення навіть за умов слабких сигналів.

У промисловості технології енергозбору виявили практичну ефективність у бездротових сенсорних мережах, що застосовуються для моніторингу технічного стану обладнання, контролю процесів та автоматизації виробництва. У таких мережах заміна батарей є або економічно не вигідною, або фізично складною, тому енергозбір дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати.

У сфері сільського господарства впроваджуються рішення для розумного агромоніторингу, де автономні сенсори контролюють показники вологості ґрунту, рівень освітлення, температуру та інші агропараметри. Завдяки цьому фермерські господарства можуть працювати більш енергоефективно та точно.

Цікавою є перспектива застосування систем енергозбирання у медичному та ветеринарному моніторингу, де бездротові сенсори

розміщуються на тілі пацієнта або тварини. Оскільки регулярна заміна елементів живлення є небажаною, можливість безперервного енергозабезпечення має суттєві переваги.

Окремий напрям – мікрохвильовий привід транспортних засобів, як-от поїздів або автономних платформ. Це футуристична, але активно досліджувана концепція, що передбачає передачу високопотужної енергії на значні відстані у мікрохвильовому діапазоні.

Таким чином, рисунок демонструє не лише різноманіття сценаріїв застосування бездротового енергозбору, а й актуальність переходу до енергоавтономних, інтелектуальних і сталих систем в умовах цифровізації та розвитку телекомунікацій.

Втім, незважаючи на значний прогрес у цій галузі, існує низка невирішених технічних і наукових викликів. До ключових проблем належать низький рівень доступної потужності навколишніх сигналів, висока чутливість до втрат в узгоджувальних колах, обмежена стабільність вихідних характеристик при змінних властивостях середовища та відсутність повноцінного адаптивного керування перетворенням енергії.

У зв'язку з цим актуальним є створення інтелектуального пристрою бездротового збору енергії, який би поєднував високоефективну антенну структуру, оптимізований ректичний каскад та мікропроцесорну систему адаптивного керування. Такий підхід забезпечить покращене відстеження умов сигналу, підвищення коефіцієнта корисної дії та досягнення стабільної роботи навіть у складних радіочастотних умовах. Саме ці завдання лежать в основі подальшого розвитку інтегрованих систем енергозбирання для сенсорних мереж телекомунікаційного призначення.

Сучасні тенденції розвитку бездротової передачі енергії пов'язані з комбінуванням кількох технологічних підходів у межах єдиної інфраструктури. Інтелектуальні системи використовують адаптивне керування режимами живлення, перемикаючись між індуктивним, резонансним або радіочастотним способом залежно від умов середовища та

вимог до потужності. Поєднання цілеспрямованого RF-підживлення з радіочастотним енергозбором із навколишніх джерел дозволяє підвищити стабільність, забезпечити енергетичну надлишковість та мінімізувати залежність від конкретного каналу передачі.

1.3.1 Приймальні антени, узгоджувальні мережі та випрямлячі для радіочастотного енергозбору

Збір радіочастотної енергії полягає у перетворенні навколишнього електромагнітного випромінювання на електричну енергію, забезпечуючи сталу альтернативу традиційним батареям для малопотужних пристроїв. На рисунку 1.2 подано загальну схему роботи такої системи: кольорові лінії відображають поширення електромагнітних хвиль від різноманітних джерел до приймальної антени, яка вловлює ці хвилі й перетворює їх на корисний електричний сигнал. У навколишньому середовищі одночасно присутні численні радіочастотні джерела, що формують доступний енергетичний ресурс, проте їхня всеспрямована та нестабільна природа зазвичай зумовлює низький рівень отримуваної потужності [3].

Підходи до збору радіочастотної енергії зазвичай поділяють на два типи: – пасивний збір навколишньої енергії, який використовує вже існуючі сигнали – мобільні базові станції, Wi-Fi маршрутизатори, FM/TV передавачі та інші джерела [2]; – спеціалізований збір енергії, також відомий як Wireless Power Transfer (WPT), що базується на спеціально створених радіочастотних сигналах для живлення віддалених або вбудованих пристроїв [4].

Попри різницю в джерелах та реалізації, обидва підходи ґрунтуються на єдиному принципі – перетворенні електромагнітної хвилі на електричну енергію. Збір радіочастотної енергії демонструє значний потенціал для автономного живлення IoT-пристроїв, бездротових сенсорних мереж, носимих систем і платформ дистанційного моніторингу, забезпечуючи їхню роботу без необхідності обслуговування.



Рисунок 1.2 – Схема системи радіочастотного збору навколишнього середовища

На рисунку 1.3 представлено деталізовану функціональну архітектуру системи збору радіочастотної енергії. Така система зазвичай включає приймальну антену, схему узгодження імпедансу та перетворювач, який здійснює випрямлення радіочастотного сигналу у сигнал постійного струму. Приймальна антена захоплює енергію навколишніх радіохвиль і передає її далі до схеми узгодження, яка забезпечує максимальну ефективність передавання енергії шляхом коректного узгодження імпедансів із випрямляльним каскадом. Надалі випрямляч перетворює змінний радіочастотний сигнал на стабілізовану напругу постійного струму, придатну для живлення електронних навантажень.

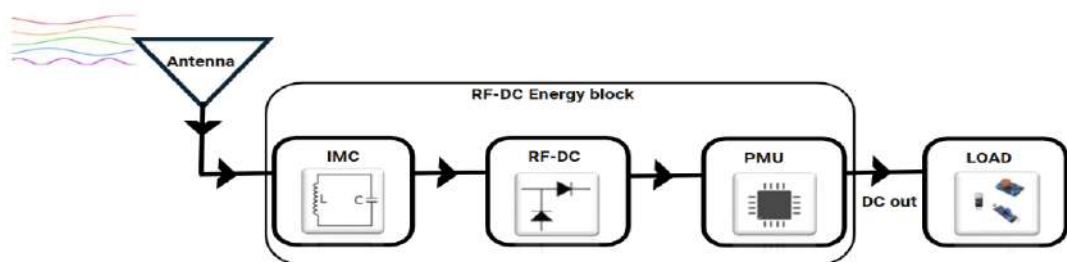


Рисунок 1.3 – Функціональні блоки системи збору радіочастотної енергії

У низці реалізацій система також може містити блок управління живленням, який відповідає за регулювання, накопичення та стабілізацію

вихідної потужності. Водночас інтеграція такого блока ускладнює конструкцію та може спричиняти додаткові енергетичні втрати.

Загальна ефективність системи збору радіочастотної енергії істотно залежить від правильного вибору її складових частин та їхньої взаємодії. Приймальна антена повинна бути оптимізована під робочу частоту й умови застосування, а структура випрямляльного каскаду визначає рівень ефективності перетворення енергії. Сукупна дія цих факторів безпосередньо впливає на практичну придатність системи у реальних умовах експлуатації.

Сучасні дослідження дедалі більше спрямовані на комплексну оптимізацію конструкції приймальних антен, елементів узгодження імпедансів та каскадів перетворення радіочастотної енергії у енергію постійного струму. Основний акцент при цьому робиться на зменшенні габаритів системи та підвищенні її енергоефективності, що є критично важливим для забезпечення роботи автономних електронних пристроїв наступного покоління.

13.2 Приймальна антена для системи збору радіочастотної енергії

Одним із ключових елементів системи збору радіочастотної енергії є приймальна антена, яка відповідає за захоплення електромагнітного випромінювання. Ефективність її роботи має вирішальний вплив на загальний коефіцієнт перетворення енергії. Правильний вибір конструкції приймальної антени визначає здатність системи працювати в умовах обмеженої доступності радіочастотних сигналів і забезпечувати достатню потужність для живлення електронних пристроїв. Антени з високим коефіцієнтом підсилення здатні ефективніше приймати слабкі сигнали, характерні для більшості навколишніх джерел.

Різні типи приймальних антен описані в наукових джерелах, і кожен із них має свої переваги залежно від сфери застосування. Зокрема, досліджуються дипольні, планарні, текстильні та гнучкі конструкції.

Текстильні та гнучкі антени, хоча й мають деякі втрати через властивості підкладки, забезпечують високу механічну гнучкість і можливість безшовної інтеграції в одяг або медичні носимі пристрої. Патч-антени є одними з найпоширеніших завдяки компактності, низькій вартості виготовлення, простоті конструкції та зручності інтеграції з електронними схемами. Вони забезпечують стабільні характеристики підсилення, контрольовану поляризацію та можливість точної адаптації до необхідного робочого діапазону.

Оскільки конструкція антени тісно пов'язана з вибором робочої частоти, особливої уваги заслуговують спектральні діапазони, які найчастіше використовуються для збору радіочастотної енергії. Діапазон 2,4–2,5 гігагерц є одним із найпоширеніших, оскільки в ньому працюють бездротові мережі, Bluetooth-пристрої та інші промислові, наукові й медичні системи. Інші можливі діапазони включають системи радіочастотної ідентифікації, стільникові мережі четвертого та п'ятого покоління, діапазони телебачення та радіомовлення. Вузькосмугові антени є доцільними тоді, коли джерело сигналу відоме та стабільне, проте вони не забезпечують одночасний прийом сигналів із різних частотних діапазонів. Для таких випадків використовуються широкосмугові та надширокосмугові антени, здатні ефективно працювати в умовах множинних джерел випромінювання.

Сучасні дослідження демонструють значні переваги надширокосмугових і багатодіапазонних конструкцій, які поєднують великий частотний діапазон із помірними значеннями коефіцієнта підсилення. Такі антени можуть забезпечувати ефективний прийом сигналів у кількох частотних діапазонах, хоча це часто потребує компромісів у вигляді складнішої геометрії або зниження підсилення. Деякі конструкції використовують кругову поляризацію, що дає змогу зменшити вплив зміни орієнтації антени та покращити стабільність прийому в умовах багатошляхового розповсюдження хвиль. Формування кругової поляризації

досягається завдяки спеціальним слотам або геометричним модифікаціям провідних елементів.

Антени малого розміру, які потрібні для носимих або імплантованих пристроїв, часто демонструють знижену ефективність випромінювання через фізичні обмеження. Значне зменшення габаритів найчастіше призводить до зменшення коефіцієнта підсилення. Наприклад, надмініатюрні монопольні конструкції можуть забезпечувати низькі значення підсилення через обмежену довжину хвильового каналу. Водночас сучасні підходи – зокрема використання метаструктур, штучних магнітних провідників, електромагнітних заборонених смуг, металінз та спеціальних високоякісних діелектриків – дають змогу суттєво покращити характеристики мініатюрних антен. Поєднання таких технологій дозволяє одночасно зберігати компактні розміри, підвищувати підсилення та формувати необхідну поляризацію.

Вибір конкретної антени повинен здійснюватися з урахуванням вимог до підсилення, смуги пропускання, типу поляризації, а також обмежень щодо розміру, можливості інтеграції та стабільності орієнтації під час експлуатації. Антени з високим підсиленням зазвичай мають більші габарити, що обмежує їх використання у носимих або імплантованих пристроях. Антени з круговою поляризацією підвищують надійність прийому, але потребують складнішої конструкції. Текстильні й гнучкі антени забезпечують високу механічну адаптивність, проте мають нижчу ефективність порівняно з жорсткими конструкціями. Надширокосмугові антени є найкращим вибором для динамічних систем Інтернету речей, що працюють у середовищі з великою кількістю різних джерел сигналу, хоча вони можуть мати нижчі значення підсилення. Отже, оптимальний вибір антени визначається конкретними вимогами цільового застосування та доступними конструктивними ресурсами.

1.3.3 Схема узгодження імпедансу для системи збору радіочастотної енергії

У системах збору радіочастотної енергії одним із ключових завдань проєктування є забезпечення максимально ефективної передачі потужності від приймальної антени до випрямляча. Для цього необхідно узгодити їхні імпеданси, оскільки будь-яка невідповідність призводить до відбиття частини енергії та зниження ефективності перетворення. Саме тому схема узгодження імпедансу відіграє фундаментальну роль, будучи проміжною ланкою між антеною та випрямляючою частиною системи. За відсутності правильно налаштованої схеми узгодження значна частина прийнятої електромагнітної енергії не може бути передана в навантаження.

Більшість антен проєктуються з фіксованим хвильовим опором, як правило, близьким до 50 Ом. Натомість вхідний імпеданс випрямляча є частотно залежним і визначається параметрами діодів, конденсаторів та інших компонентів випрямляючої схеми. Така різниця в характеристиках ускладнює безпосереднє з'єднання антени з випрямлячем, тому застосування схеми узгодження є необхідною умовою ефективної роботи системи. Якість узгодження зазвичай оцінюється за коефіцієнтом відбиття, який відображає частку потужності, що повертається назад до джерела через невідповідність імпедансів. Загальноприйнятим критерієм вважається рівень нижче мінус десяти децибел, що означає передачу приблизно дев'яноста відсотків енергії в навантаження.

Існує кілька основних топологій схем узгодження, серед яких найпоширенішими є L-, T- та π -подібні конфігурації. L-топология має переваги у вигляді простоти, компактності та легкості реалізації, що робить її особливо привабливою для мініатюризованих і носимих систем збору енергії. T- та π -конфігурації забезпечують точніше узгодження в широкому діапазоні частот, проте мають більшу площу та складнішу конструкцію.

За принципом реалізації схеми узгодження поділяють на два основні підходи: реалізацію на основі зосереджених елементів і реалізацію на основі розподілених ліній передачі. Схеми із зосередженими компонентами використовують індуктивності та конденсатори й характеризуються компактністю та зручністю інтеграції, що робить їх оптимальними для портативних та імплантованих пристроїв. У таких системах часто застосовують комбінацію послідовної індуктивності та паралельної ємності, що забезпечує вдале узгодження в заданому частотному діапазоні.

Підходи, засновані на лініях передачі, використовують відкриті, короткозамкнені, радіальні чи звивисті шунти, що друкуються безпосередньо на підкладці антени або випрямляча. Такі схеми забезпечують високу точність узгодження та дозволяють реалізовувати багатодіапазонні властивості. У складніших проектах застосовуються гібридні схеми, які поєднують індуктивності, ємності та елементи ліній передачі, що дає змогу досягти низьких значень коефіцієнта відбиття на кількох частотах одночасно та спростити інтеграцію з випрямлячем.

Сучасним напрямом є використання структур, натхненних метаматеріалами, зокрема електромагнітних заборонених смуг. Інтеграція таких елементів у смуги ліній передачі дає змогу незалежно налаштовувати ефективну електричну довжину окремих сегментів схеми узгодження для різних частот. Завдяки цьому вдається створювати компактні багаточастотні схеми, що особливо актуально для систем із обмеженою площею підкладки та потребою в широкосмуговому захопленні енергії.

Підсумовуючи, вибір оптимальної схеми узгодження імпедансу залежить від вимог до частотного діапазону, габаритних обмежень та рівня допустимої складності конструкції. Схеми зі зосередженими компонентами є найкращим вибором для мініатюрних і імплантованих пристроїв, схеми на основі ліній передачі забезпечують гнучкість у багатодіапазонних системах, а гібридні та метаматеріальні конфігурації дозволяють поєднати компактність і

високу ефективність, що відповідає потребам систем збору радіочастотної енергії нового покоління.

Попри значний прогрес у галузі радіочастотного збору енергії, низка ключових викликів продовжує стримувати широке впровадження цих систем. Одним із головних обмежень залишається низька густина потужності навколишніх радіочастотних джерел, що вимагає ретельної оптимізації всього тракту перетворення енергії — від приймальної антени до каскадів випрямлення. На етапі приймання саме антена визначає здатність системи ефективно акумулювати енергію, однак створення конструкцій, які одночасно забезпечують високий коефіцієнт підсилення, багатосмуговий або широкосмуговий режим роботи, кругову поляризацію та компактність, залишається складним завданням, особливо для переносних або імплантованих пристроїв.

Для подолання цих обмежень у наукових роботах пропонуються різноманітні підходи до проектування антен — від прорізних конфігурацій та використання матеріалів із низькими втратами до застосування метаповерхонь і метаматеріальних структур. Такі рішення здатні суттєво покращити експлуатаційні характеристики, проте часто супроводжуються збільшенням складності конструкції та зростанням вартості виготовлення.

Узгоджувальні мережі відіграють не менш важливу роль, оскільки повинні забезпечувати максимально ефективну передачу потужності в умовах змінної частоти та навантаження. Найпоширенішими залишаються схеми на основі індуктивно-ємнісних елементів, які вирізняються простотою інтеграції, тоді як мережі, побудовані на основі розподілених ліній передачі, краще сумісні з друкованими платами, проте характеризуються більшими габаритними розмірами та обмеженою гнучкістю налаштування. Нові гібридні та метаматеріальні архітектури пропонують перспективні компромісні рішення, хоча їх розвиток перебуває на початковому етапі.

Ще одним суттєвим вузьким місцем є каскади випрямлення. Багаторівневі структури, такі як множники напруги або подвоювачі,

дозволяють отримувати підвищені вихідні напруги, однак зазвичай демонструють знижену ефективність за низьких рівнів радіочастотної потужності або у складних багатоступневих конфігураціях. Важливим аспектом є також ефективна інтеграція з елементами зберігання енергії — мініатюрними батареями чи суперконденсаторами, що забезпечують стабільну роботу системи за умов мінливого електромагнітного середовища.

Мініатюризація технічних рішень залишається одним із ключових напрямів розвитку, оскільки здатність безшовно інтегрувати радіочастотний енергозбір у компактні пристрої є критичною для сучасних застосувань. Нові виробничі технології — гнучкі підкладки, тривимірний друк, функціональні композитні матеріали — відкривають можливості для створення легких і компактних систем, хоча й породжують додаткові виклики щодо масштабованості та вартості.

Важливу роль у подальшому розвитку відіграє інтеграція алгоритмів штучного інтелекту, які забезпечують адаптивну оптимізацію параметрів системи у реальному часі. Такі алгоритми можуть автоматично регулювати резонансні частоти та просторові характеристики антени, підлаштовувати параметри узгоджувальних мереж відповідно до змін навколишнього середовища, а також перемикати режими роботи випрямляча залежно від сили або форми сигналу. Використання машинного навчання дозволяє підвищити ефективність без необхідності фізичного переналаштування апаратної частини, що є важливим кроком до створення інтелектуальних, адаптивних систем радіочастотного енергозбору.

Забезпечення стабільної роботи таких систем у реальних умовах вимагає також урахування впливу перешкод, багатошляхового поширення та екстремальних температурних режимів. Подолання цих викликів потребує міждисциплінарного підходу, що охоплює матеріалознавство, радіочастотне проєктування, мікроелектроніку, енергетичні системи та інтелектуальні алгоритми керування. З огляду на швидке зростання ринку Інтернету речей, автономних сенсорних мереж та біомедичних пристроїв, технології

радіочастотного збору енергії мають потенціал стати основою для створення сталих, автономних і розумних енергетичних рішень майбутніх підключених екосистем.

1.4 Інтелектуальні поверхні та метаповерхні для збору енергії

Розвиток метаматеріалів та інтелектуальних поверхонь нового покоління, відомих як Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS), відкрив принципово нові можливості для керування електромагнітними хвилями. Такі поверхні складаються з великої кількості керованих субхвильових елементів, кожен із яких здатний локально змінювати фазу, амплітуду, поляризацію або напрям відбиття падаючої хвилі. Завдяки цьому RIS перетворюються на програмовані електромагнітні структури, що можуть адаптивно формувати просторовий розподіл поля відповідно до поставлених задач.

У контексті бездротового енергозбору інтелектуальні поверхні використовуються у двох базових режимах. У пасивному режимі RIS функціонує як керована відбивальна метаповерхня, яка перенаправляє або фокусує падаючі хвилі на приймальних антенах системи енергозбирання. Це дозволяє значно підвищити густину потужності у потрібній зоні навіть за умов слабого або розсіяного сигналу. В активному режимі метаповерхня доповнюється інтегрованими приймальними елементами та випрямлячами (ректенами), перетворюючи RIS на велику інтелектуальну панель енергозбору, здатну як керувати хвилями, так і безпосередньо збирати електромагнітну енергію. Такий підхід забезпечує масштабований перехід від одиничних ректен до «енергетичних оболонки» будівель та об'єктів.

Використання інтелектуальних поверхонь у системах енергозбирання дає низку переваг, зокрема суттєве збільшення ефективної апертури приймання та можливість фокусування енергії в задані напрямки без необхідності механічного орієнтування елементів. RIS демонструють особливо високий потенціал у складних середовищах із багатопроменевим

поширенням, де традиційні антени втрачають ефективність через інтерференційні явища. Завдяки електронному керуванню параметрами елементів така поверхня може адаптуватися до зміни положення джерела або до динаміки середовища, забезпечуючи стабільний потік енергії на приймальний модуль.

Інтелектуальні поверхні та метаповерхні розглядаються як перспективна основа для створення масштабованих рішень у галузі живлення масових сенсорних мереж, інфраструктури Інтернету речей та систем автономного моніторингу. Їх здатність до програмованого керування електромагнітним середовищем робить їх ключовим компонентом майбутніх енергетично самодостатніх мереж та розумних архітектурних оболонок.

1.5 Системи адаптивного керування та оптимізації енергозбору

Оскільки рівень доступної радіочастотної енергії в реальних умовах часто є низьким, нерівномірним та залежним від динаміки середовища, вирішальну роль у підвищенні ефективності бездротового енергозбору відіграють системи адаптивного керування. Такі системи забезпечують узгодження параметрів приймальних антен, ректичних модулів та накопичувачів енергії зі змінними умовами радіооточення, завдяки чому досягається максимальний коефіцієнт перетворення навіть при незначних рівнях вхідного сигналу.

Одним із ключових напрямів адаптації є динамічне налаштування антенної підсистеми. Це може включати перемикання конфігурацій антенних масивів, зміну резонансної частоти елементів або оптимізацію діаграми спрямованості для фокусування енергії у найбільш вигідному напрямку. Такі підходи дозволяють формувати гнучку “енергетичну апертуру”, яка підлаштовується під реальні умови та компенсує просторові флуктуації сигналу.

Другим важливим аспектом є адаптивне керування роботою ректичного каскаду. Використання діодів із низькою напругою відкриття, динамічне перемикання режимів випрямлення та автоматична оптимізація навантаження дозволяють підтримувати високий коефіцієнт корисної дії перетворення при зміні потужності вхідного сигналу. Це особливо актуально для систем, що працюють у діапазонах мікро- та міліватного живлення.

Окрему роль відіграє оптимізація енергетичного балансу всієї системи. Застосування алгоритмів MPPT (Maximum Power Point Tracking) у високочастотному середовищі дозволяє автоматично знаходити точку максимальної потужності, навіть коли параметри хвилі змінюються у часі. Додатково використовуються підходи до ефективного розподілу зібраної енергії між накопичувачами та алгоритми планування енергоспоживання для автономних датчиків і сенсорних мереж.

Сучасні системи також активно інтегрують елементи штучного інтелекту. Машинне навчання застосовується для прогнозування умов радіооточення та прогнозування зміни траєкторій джерел випромінювання, а адаптивні моделі дозволяють інтелектуально керувати параметрами антенних решіток та конфігурацією RIS, оптимізуючи передачу та приймання енергії у реальному часі.

Загалом адаптивні системи забезпечують істотне підвищення стабільності та ефективності енергозбору, роблячи процес перетворення енергії менш залежним від коливань сигналу, перешкод та просторових змін середовища. Їх використання є ключовим фактором для практичного впровадження технологій бездротового живлення у масштабних сенсорних мережах, IoT-платформах та автономних інтелектуальних системах.

1.6 Аналіз наукових підходів і виявлення невирішених завдань

Проблема бездротового збору енергії активно досліджується у зв'язку з розвитком технологій IoT, автономних сенсорних систем, мереж моніторингу,

а також бездротових телекомунікаційних систем нового покоління. Зростання кількості малопотужних пристроїв створює потребу у джерелах живлення, здатних працювати тривалий час без заміни батарей. У цьому контексті перетворення навколишньої радіочастотної або електромагнітної енергії на електричну, придатну для живлення електроніки, є одним із ключових напрямів сучасних досліджень [1].

Суттєвий внесок у вивчення ефективності процесу збору енергії зроблено в українських наукових роботах, де особливу увагу приділено приймально-випрямляючим модулям (ректенам). Ректена поєднує антену та випрямляч у єдиній структурі, забезпечуючи пряме перетворення електромагнітної хвилі у постійний струм [2], [3]. Ефективність таких систем значною мірою визначається геометрією антени, узгодженням з випрямлячем, спектральними характеристиками сигналу, а також рівнем потужності, що надходить до входу ректичного каскаду. Значний інтерес викликають широкосмугові та багатодіапазонні рішення, які здатні одночасно збирати енергію з різних стандартів бездротового зв'язку (Wi-Fi, LTE, 5G, Bluetooth тощо).

В останні роки у світовій і вітчизняній науці відчутно посилився інтерес до інтелектуальних багаторівневих поверхонь та метаповерхонь, здатних динамічно керувати електромагнітними хвилями. Такі структури, що належать до класу RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces), містять велику кількість керованих металементів, характеристика яких може змінюватися в режимі реального часу під дією електронного керування [4], [5]. Це дозволяє поверхні працювати як керована «дзеркальна» або «лінзова» структура, що перенаправляє або фокусує хвилі, підсилюючи їх у потрібній точці. У контексті енергозбору RIS відкривають можливість створення «енергетичних коридорів», концентрації потоку енергії на компактних приймальних елементах або навіть прямої інтеграції ректичних модулів у структуру самої поверхні.

Серед українських досліджень варто виділити роботи, виконані в Хмельницькому національному університеті, де детально вивчено вплив геометрії антенних елементів, діелектричних підкладок та частотних властивостей матеріалів на ефективність поглинання енергії в діапазонах WiMAX та 5G [6]. У ряді праць запропоновано використання фрактальних та ширококутових форм антен, що забезпечують кращу стабільність прийому за умов змінного радіочастотного середовища [7].

Окремий напрям досліджень стосується багаторівневих антенних решіток та ієрархічних структур збору енергії [8]. Такі системи дозволяють здійснювати просторове сумування енергії від великої кількості малих антенних елементів, формуючи спільний вихідний канал з вищим рівнем потужності. Це особливо актуально для середовищ із низькою щільністю енергії, де одиничний елемент не здатний зібрати достатню кількість енергії для живлення пристрою.

Отже, сучасний стан досліджень демонструє, що ефективність бездротових систем збору енергії визначається сукупністю чинників: вибором архітектури антени, використанням ширококутових або багаторівневих структур, застосуванням метаповерхонь для керованого перенаправлення енергії, а також впровадженням алгоритмів адаптивного керування фазою і формуванням променя. У зв'язку з цим розробка інтелектуальної багаторівневої поверхні для збору енергії, яка поєднує властивості метаповерхонь, ширококутових антен та адаптивних алгоритмів оптимізації, є актуальним і перспективним напрямом сучасної радіотехніки та телекомунікацій.

1.7 Висновок до першого розділу

У першому розділі було проаналізовано сучасний стан технологій бездротового енергозбору, розглянуто фізичні принципи поширення та перетворення електромагнітної енергії, методи передачі енергії, а також

сучасні рішення на основі метаповерхонь і інтелектуальних систем керування. Проведений огляд показав, що розвиток цієї галузі обумовлений зростанням попиту на автономні сенсорні мережі, пристрої Інтернету речей та портативну електроніку. Існуючі підходи забезпечують базовий рівень енергоживлення малопотужних пристроїв, однак їх ефективність значною мірою обмежується низькою щільністю доступних радіосигналів, втратами в узгоджувальних ланках та залежністю роботи системи від умов навколишнього середовища.

Разом із тим аналіз літературних джерел засвідчив, що перспективними напрямками розвитку є застосування метаповерхонь, високочутливих елементів випрямлення та адаптивних схем оптимізації, здатних підвищити коефіцієнт перетворення та забезпечити стабільність роботи енергозбираючих пристроїв у змінних умовах. Виявлені науково-технічні проблеми й невирішені завдання визначають актуальність подальших досліджень, спрямованих на розроблення інтелектуального пристрою бездротового енергозбору, що поєднуватиме сучасні апаратні та алгоритмічні рішення для підвищення енергоефективності та автономності телекомунікаційних систем.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ЗБИРАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Основи та вимоги до багаторівневої збиральної поверхні

Багаторівнева збиральна поверхня є спеціалізованою електромагнітною структурою, призначеною для ефективного приймання та перетворення радіочастотної енергії у корисну електричну. Її архітектура базується на принципі розподілу функцій між окремими рівнями — антенно-приймальним, узгоджувальним, випрямляючим та керуючим. Кожен рівень виконує власну роль у формуванні енергетичного каналу: від початкового захоплення електромагнітної хвилі та адаптивного узгодження імпедансів до перетворення високочастотного сигналу в постійну напругу та оптимізації енергетичних потоків. Такий поділ забезпечує гнучкість та можливість оптимізації окремих блоків без порушення цілісності всієї системи. Важливою властивістю є низьковтратна взаємодія між рівнями, яка гарантує мінімальні втрати енергії та дозволяє системі пристосовуватися до змін у зовнішньому середовищі, зокрема до варіацій рівня сигналу, частоти та напрямку падіння хвилі.

До основних вимог, що висуваються до багаторівневої збиральної поверхні, належать високі параметри чутливості та стабільності під час роботи у широкому частотному та просторовому діапазоні. Оскільки рівень доступної радіочастотної енергії зазвичай є низьким, конструкція поверхні повинна забезпечувати максимальне поглинання й мінімізувати відбиття хвилі, що часто реалізується за допомогою метаматеріальних елементів з можливістю електронного або варикапного керування. Важливим є також забезпечення керованої зміни фазових та амплітудних характеристик елементів, що дозволяє формувати бажану діаграму спрямованості та фокусувати енергію в

напрямку найпотужнішого джерела. Низькі втрати у випрямляючому каскаді, ефективна фільтрація імпульсних складових та коректне узгодження імпедансів суттєво впливають на загальний коефіцієнт перетворення RF–DC. Модульність конструкції, у свою чергу, забезпечує можливість масштабування системи, дозволяючи нарощувати площу та ефективну апертуру збиральної поверхні відповідно до необхідного рівня потужності або вимог конкретного застосування. Такий підхід формує основу для побудови високоефективних інтелектуальних систем бездротового енергозбору.

2.2 Математичні моделі відгуку елементів поверхні

Елементи збиральної поверхні – метаматеріальні резонатори, фазові комірки, варикапні або діодні керовані структури – мають складний електромагнітний відгук, який змінюється залежно від частоти падаючої хвилі, амплітуди сигналу та прикладеної керовальної напруги. Оскільки ці елементи працюють у режимі активного або пасивного керування, їх поведінка описується комплексними параметрами, що визначають відбиття, поглинання, фазовий зсув і перетворення енергії. Основою для математичного моделювання є комплексний коефіцієнт відбиття $\Gamma(\omega, U)$, який відображає, яку частину енергії елемент повертає в простір і як змінюється фаза відбитої хвилі. Залежність від керовальної напруги U дозволяє розглядати такі структури як динамічно керовані, що особливо важливо в інтелектуальних поверхнях із адаптивним фокусуванням енергії.

Для опису роботи окремої комірки метаповерхні застосовується типова узагальнена модель, що дозволяє формалізувати її електромагнітні властивості та вплив на хвильові процеси. Така модель охоплює три ключові та взаємопов'язані складові, які визначають реакцію елемента на падаюче випромінювання, його здатність змінювати фазові характеристики сигналу та ефективність поглинання або передачі енергії. Кожна з цих складових

відповідає за певний фізичний механізм у структурі комірки і в сукупності забезпечує повний опис її функціонування у складі інтелектуальної збиральної поверхні.

Імпеданс металементу в частотній області описується виразом

$$Z(\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C(U)}, \quad (2.1)$$

де R – активний опір елемента,

L – власна індуктивність,

$C(U)$ – ємність, що залежить від керуючої напруги U , а

ω – кутова частота електромагнітного сигналу.

Дана модель дозволяє врахувати всі основні складові реактивного та активного опору, які визначають частотні та резонансні властивості метаповерхні.

Методично коректне використання імпедансної моделі є необхідним для аналізу поведінки комірок у широкому діапазоні частот. Особливу роль відіграє нелінійність ємності $C(U)$, характерна для варикапів, мікродіодів або інших напівпровідникових структур із керованим р–n-переходом. Саме ця нелінійність забезпечує можливість зміни резонансної частоти елемента та дозволяє реалізувати такі функції, як:

- електронне сканування пучка;
- адаптивне налаштування метаповерхні під параметри зовнішнього сигналу;
- оптимізація коефіцієнта приймання та поглинання енергії;
- компенсація змін середовища або кутів падіння хвилі.

Таким чином, імпедансна модель є базовим інструментом для синтезу та дослідження інтелектуальних збиральних поверхонь, оскільки вона дозволяє точно визначати робочі режими комірок та їх здатність до керованої взаємодії з електромагнітними хвилями.

Математична модель фазової характеристики металементу задається виразом

$$\varphi(\omega, U) = \arg(\Gamma), \quad (2.2)$$

де φ – фазовий зсув відбитої хвилі,

ω – кутова частота сигналу,

U – керуюча напруга, а

Γ – коефіцієнт відбиття елемента.

Дана залежність описує, як змінюється фаза відбитої електромагнітної хвилі під впливом електричного керування або частотних характеристик елемента.

Методично модель є ключовою при аналізі та проектуванні метаповерхонь, оскільки саме фазовий зсув визначає можливість просторового формування електромагнітного поля. У великих багатоканальних або багаторівневих метаповерхнях фазові відгуки окремих елементів комбінуються, створюючи сумарний керований ефект. Завдяки цьому забезпечується синтез діаграм спрямованості, електронне сканування, фокусування енергії у визначені області простору або формування зон із підвищеним поглинанням.

Контрольованість фази є визначальним фактором ефективності інтелектуальних поверхонь: саме вона забезпечує узгоджену взаємодію між елементами масиву, мінімізує паразитні відбиття та дозволяє реалізувати адаптивні режими роботи залежно від умов зовнішнього середовища.

Модель поглинання та пропускання енергії описується рівнянням

$$A = 1 - |\Gamma|^2 - |T|^2, \quad (2.3)$$

де A – коефіцієнт поглинання,

$| \Gamma |^2$ – частка потужності, що відбивається елементом, а

$| T |^2$ – частка потужності, що проходить крізь елемент.

Це рівняння ґрунтується на законі збереження енергії й дозволяє кількісно визначити, яка частина падаючого електромагнітного потоку дійсно поглинається метаповерхнею та може бути перетворена далі в корисну електричну енергію.

У задачах бездротового збору енергії оптимальним є режим, у якому коефіцієнт поглинання A наближається до максимального значення. Це означає мінімізацію втрат на відбиття та небажане проходження хвилі через елемент. Поглинена енергія передається до випрямляючого каскаду, де перетворюється на постійну напругу і може бути використана для живлення електронних навантажень або заряджання накопичувачів. Тому точне визначення A є критично важливим для оцінки ефективності окремих елементів і всієї збиральної поверхні в цілому.

Важливо, що елементи збиральної поверхні часто містять діодні структури, які працюють у нелінійному режимі. Наявність порогової напруги, ефект насичення, залежність відгуку від амплітуди сигналу та виникнення гармонік роблять поведінку таких елементів суттєво нелінійною. Тому точні моделі повинні враховувати повну нелінійну характеристику діодів, враховуючи їх вольт-амперні криві, динамічну ємність та паразитні параметри. Включення цих факторів дозволяє правильно прогнозувати роботу елементів у складі багаторівневої поверхні та проводити оптимізацію енергозбору у складних умовах середовища.

У підсумку, математичні моделі відгуку елементів є ключем до точного розрахунку ефективності метаповерхонь, побудови оптимізаційних алгоритмів і прогнозування взаємодії елементів у повноцінній інтелектуальній структурі. Вони забезпечують точне налаштування кожного етапу перетворення енергії – від приймання до випрямлення й акумулювання.

2.3 Модель формування спрямованості та підсилення

Збиральна поверхня, виконана у вигляді антенного масиву або метаповерхні, формує діаграму спрямованості за рахунок узгодженого фазового керування своїми елементами.

Формування діаграми спрямованості багаторівневої збиральної поверхні, виконаної у вигляді антенного масиву або метаповерхні, базується на узгодженому фазовому керуванні окремих елементів. Кожен елемент системи генерує або приймає електромагнітне поле, яке в сумі формує загальний радіаційний або приймальний патерн. Узгоджене фазування дозволяє керувати напрямком максимального прийому енергії, шириною основного променя та рівнем бічних пелюсток.

У класичному підході для лінійного антенного масиву амплітудно-фазова характеристика визначається сумуванням полів окремих елементів за формулою:

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(kd_n \sin \theta + \phi_n)}, \quad (2.4)$$

де a_n – амплітуда сигналу n -го елемента,

d_n – координата елемента відносно центру,

ϕ_n – фазовий зсув, що задається системою керування,

$k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число,

λ – довжина хвилі.

Нормований масивний множник застосовується для оцінки структури діаграми спрямованості:

$$AF(\theta) = \frac{|E(\theta)|}{\max_{\theta} |E(\theta)|}. \quad (2.5)$$

Для чисельного аналізу моделі було прийнято типові параметри Wi-Fi/IoT систем: робоча частота $f = 2.45\text{ГГц}$, довжина хвилі $\lambda = 0.12236\text{м}$, кількість елементів лінійної підрешітки $N = 8$, міжелементна відстань $d = \lambda/2 = 0.06118\text{м}$, коефіцієнт використання апертури $\eta = 0.6$.

Довжина решітки визначається як:

$$L = (N - 1)d = 7 \cdot 0.06118 = 0.42827 \text{ м.}$$

Площа плоскої апертури розраховується за формулою:

$$A_{\text{phys}} = L \cdot \frac{\lambda}{2} = 0.42827 \cdot 0.06118 \approx 0.02620$$

а ефективна площа враховує коефіцієнт використання:

$$A_{\text{eff}} = \eta A_{\text{phys}} = 0.6 \cdot 0.02620 \approx 0.01572$$

Максимальний коефіцієнт підсилення визначається за класичною формулою:

$$G_{\text{max}} = \frac{4\pi A_{\text{eff}}}{\lambda^2}. \quad (2.6)$$

Підставивши чисельні значення, отримуємо:

$$G_{\text{max}} = \frac{4\pi \cdot 0.01572}{(0.12236)^2} \approx 13.19,$$

що в децибелах:

$$G_{\text{max,dBi}} = 10\log_{10}(13.19) \approx 11.2 \text{ dBi.}$$

Таким чином, навіть відносно проста 8-елементна підрешітка забезпечує суттєве підсилення, підвищуючи ефективність збору електромагнітної енергії.

Було змодельовано два режими роботи підрешітки:

1. Максимум у напрямку 0° : $\phi_n = 0$.
2. Сканування променя на кут $\theta_0 = 30^\circ$: $\phi_n = -kd_n \sin \theta_0$.

Обчислення нормованого масивного множника проводились для кутів $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$ з кроком 5° . Результати показали:

- При скануванні основний пелюсток зміщується на 30° , а рівень бічних пелюсток суттєво змінюється.
- Максимальний коефіцієнт підсилення зменшується у порівнянні з broadside-режимом.
- Broadside забезпечує найбільший G_{\max} , але вузький кут охоплення.
- Сканування дозволяє розширити область ефективного енергозбору.

Таблиця 2.1 – Нормований масивний множник для максимуму напрямку та сканування:

Кут, $^\circ$	Масивний множник (0°) [дБ]	Масивний множник (30°) [дБ]
-30	-9.28	-22.34
-20	-3.84	-9.05
-10	-0.40	-1.13
0	0.00	-0.66
10	-0.40	-4.73
20	-3.84	-14.66
30	-9.28	0.00

Ширина основного пелюстка визначався за критерієм

$|AF(\theta_{3dB})| = 0.707$. Результати:

Режим	Ширина основного пелюстка
Максимум	11.8°
Сканування 30°	13.7°

Для оцінювання просторових характеристик 8-елементної підрешітки було проведено моделювання нормованого масивного множника у двох режимах роботи: формування променя в напрямку нормалі до поверхні (broadside-режим) та його сканування на кут 30° . Аналіз дозволяє встановити, як зміна фазового розподілу між елементами впливає на положення основного пелюстка, рівні бічних пелюстків та загальну ширину діаграми спрямованості. Отримані результати демонструють характерні відмінності між режимами, що є важливим для подальшої оптимізації ефективності збору електромагнітної енергії системою.

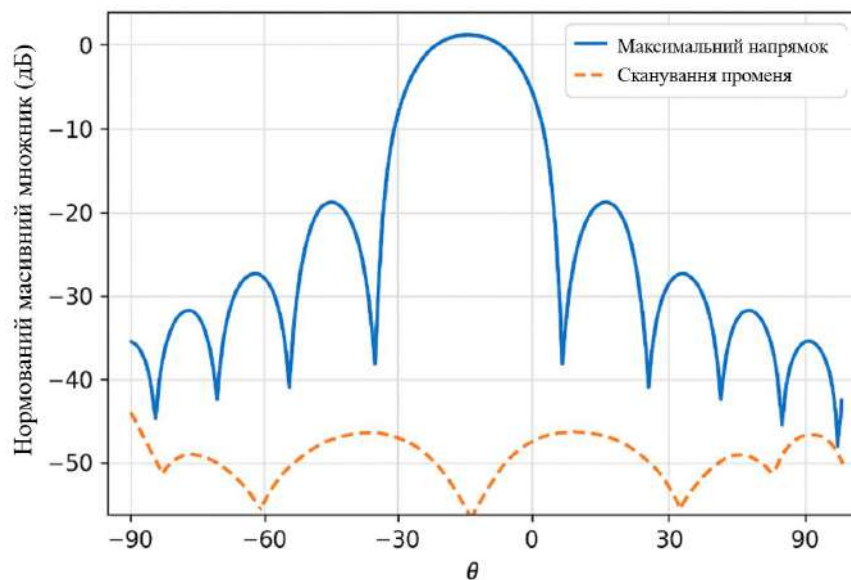


Рисунок 2.1 – Нормовані масивні множники 8-елементної підрешітки

Збільшення ширини променя при скануванні є очікуваним і визначається геометрією апертури.

Математичні розрахунки показують, що багаторівнева збиральна поверхня здатна:

- формувати керовану діаграму спрямованості;
- збільшувати ефективну площу прийому електромагнітної енергії;
- адаптивно змінювати напрямок максимального прийому;

- працювати у режимі широкого просторового охоплення за допомогою фазового керування елементами.

Фактично, метаповерхня функціонує як інтелектуальна енергетична апертура, що сама «орієнтується» на найкращі джерела енергії у просторі. Навіть одновимірна підрешітка з невеликою кількістю елементів забезпечує значний коефіцієнт підсилення (~ 11.2 dBi), керовану структуру променя, можливість зміщення максимуму без переміщення всієї поверхні та зниження рівня бічних пелюсток. У багаторівневій архітектурі такі підрешітки комбінуються, створюючи складну енергозбиральну метаповерхню із широким кутовим охопленням та підвищеною ефективністю.

Оптимізація фазового профілю дозволяє фокусувати енергію у напрямку найбільш інтенсивного сигналу або, навпаки, розподіляти її рівномірно, якщо це підвищує сумарний рівень енергозбору. Метаповерхні здатні формувати складні діаграми, включаючи декілька напрямків фокусування та широкополосні режими.

2.4 Алгоритми адаптивного керування та оптимізації збору енергії

Інтелектуальна система енергозбору базується на використанні адаптивних алгоритмів керування, які забезпечують динамічне переналаштування параметрів метаповерхні відповідно до змін зовнішніх умов. Основна мета таких алгоритмів – максимізація поглиненої та перетвореної енергії за умов змінної інтенсивності сигналу, частоти, кута падіння хвилі чи наявності завад. У практичних системах доцільно поєднувати різні групи методів, оскільки кожна з них здатна ефективно працювати у певних класах задач та конфігурацій метаповерхні.

Першу групу становлять градієнтні методи оптимізації, які безпосередньо коригують фазові та амплітудні характеристики елементів на

основі похідних цільової функції – наприклад, потужності на виході випрямляча. Такі методи забезпечують високу швидкість збіжності та застосовуються у режимах із відносно гладким функціоналом відгуку поверхні. Друга група включає евристичні алгоритми, до яких належать генетичні, ройові та еволюційні підходи. Вони ефективні у випадках складного, багатовимірного та нелінійного простору параметрів, де наявні численні локальні максимуми, а відгук елемента має суттєво виражену нелінійність.

Третю групу формують методи машинного навчання, зокрема регресійні моделі, дерева рішень, а також глибинні нейронні мережі. Такі моделі здатні за попередніми даними або статистичними закономірностями прогнозувати оптимальні налаштування метаповерхні для різних сценаріїв поширення хвиль. Особливу ефективність вони демонструють у системах, де умови середовища змінюються швидко або мають стохастичний характер. Нарешті, ключовим компонентом є замкнені системи зворотного зв'язку, що виконують безперервні вимірювання вихідних величин (потужності, напруги, коефіцієнта узгодження) та коригують налаштування у режимі реального часу за принципом адаптивного контролю.

Завдяки поєднанню наведених алгоритмів система здатна підтримувати оптимальний режим енергозбору незалежно від зміни інтенсивності сигналу, орієнтації джерела, частотного діапазону або наявності перешкод, забезпечуючи високу ефективність і стабільність роботи у широкому спектрі умов.

2.5 Обґрунтування архітектури та критерії ефективності

Архітектура інтелектуальної збиральної системи радіочастотної енергії повинна формуватися як багатofункціональна модульна структура, у якій

кожен блок виконує окрему роль у процесі приймання, перетворення та керування енергетичними потоками. Взаємодія між блоками має бути узгодженою та мінімально втратною, оскільки навіть незначні похибки в узгодженні імпедансів або алгоритмічному керуванні можуть істотно знизити коефіцієнт перетворення. У типових системах енергозбору архітектура включає як пасивні елементи (анти, резонансні осередки, перетворювачі), так і активні компоненти, відповідальні за аналіз середовища, оптимізацію параметрів і передачу експлуатаційної інформації.

До складу системи обов'язково входить антенна структура або метаповерхня, яка забезпечує ефективне поглинання радіочастотної енергії в широкому діапазоні частот. Узгоджувальне коло мінімізує відбиття потужності завдяки динамічному підлаштуванню імпедансу. Випрямляч (ректифікатор) перетворює змінний радіочастотний сигнал у постійну напругу; його ефективність визначає загальний RF–DC коефіцієнт перетворення. Ключовим елементом є модуль адаптивного керування, який може бути реалізований на мікроконтролері, алгоритмах машинного навчання або гібридних інтелектуальних моделях. Він виконує оптимізацію фазових зсувів, керування імпедансом, перемикання режимів та аналіз енергетичного балансу. Блок накопичення енергії забезпечує стабільну роботу кінцевих пристроїв, згладжує флуктуації вхідної потужності та підтримує аварійні режими. Завершальним елементом є телеметричний модуль, що передає інформацію про стан системи, рівень накопиченої енергії, параметри приймання та ефективність.

Ефективність архітектури оцінюється за низкою критеріїв. Основним є коефіцієнт RF–DC перетворення, який характеризує здатність системи перетворювати поглинуту енергію у корисну електричну форму. Додаткову роль відіграють енергетичний ККД узгоджувальних кіл, втрати у ректифікаторі, а також стабільність вихідної напруги в умовах змінних рівнів

сигналу. Важливими параметрами є час адаптації – швидкість реакції на зміну умов середовища, та ефективна площа поглинання, що визначає здатність поверхні працювати з низькоінтенсивними сигналами. Оптимальна архітектура дозволяє забезпечити ефективний енергозбір навіть у складних сценаріях, таких як багатопроменеве поширення, наявність завад або нестача доступної радіочастотної енергії.

На рисунку 2.2 подано узагальнену структурну схему роботи інтелектуальної системи бездротового енергозбору, яка забезпечує перетворення низькорівневої радіочастотної енергії у корисну електричну напругу з подальшим її накопиченням та аналізом стану системи. Архітектура включає послідовність функціональних модулів, що виконують приймання енергії, узгодження імпедансів, високоефективне випрямлення, оптимізацію режимів роботи за допомогою адаптивного контролю та передачу телеметричних даних. Така побудова забезпечує стабільність вихідних параметрів та підвищення загального ККД системи навіть за мінімальних рівнів доступної RF-потужності.



Рисунок 2.2 – Схема роботи інтелектуальної системи бездротового енергозбору

2.6 Висновок до другого розділу

У другому розділі розглянуто теоретичні основи побудови інтелектуальної збиральної системи, визначено концепцію багаторівневої поверхні та вимоги до її структури. Проаналізовано математичні моделі елементів, принципи формування діаграми спрямованості та методи підсилення прийнятого сигналу.

Особливу увагу приділено алгоритмам адаптивного керування, що забезпечують підвищення ефективності збору енергії в умовах змінного електромагнітного середовища. Обґрунтована архітектура системи демонструє, що поєднання метаповерхні, високоефективного випрямляча та інтелектуального керованого модуля є оптимальним підходом для створення сучасних автономних енергозбиральних пристроїв.

3 РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ БАГАТОРІВНЕВОЇ ЕНЕРГОЗБИРАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

У цьому розділі здійснюється розробка інтелектуальної багаторівневої системи збору електромагнітної енергії, орієнтованої на підвищення ефективності прийому в умовах змінного напрямку опромінення. Розглянуто типову архітектуру енергозбирних систем, принципи формування спрямованості, роботу пасивних мереж beamforming та створення нової ієрархічної структури, що поєднує горизонтальне та вертикальне керування променем. Запропонована архітектура поєднує модульність, високий коефіцієнт підсилення та здатність адаптуватися до різних радіочастотних сценаріїв, що дозволяє сформувати ефективну концепцію великомасштабного бездротового енергозбору.

3.1 Проєктування структури приймальних елементів

Типова система збору радіочастотної енергії складається з послідовних функціональних блоків, кожен з яких виконує окрему роль у забезпеченні максимально ефективного перетворення електромагнітного сигналу на корисну електричну енергію. На рисунку 3.1 представлено узагальнену архітектуру приймального тракту, що включає антенний елемент, узгоджувальну мережу, високочутливий випрямляч та фільтр вихідної напруги.

У типовій архітектурі системи збору радіочастотної енергії функціональний ланцюг складається з низки послідовно з'єднаних елементів, кожен з яких виконує окрему, але критично важливу роль у перетворенні електромагнітної енергії на придатну для використання електричну потужність. Основним елементом є антена-приймач, яка взаємодіє з навколишнім радіочастотним полем і формує початкову вхідну потужність.

Саме характеристики антени визначають обсяг зібраної енергії, її спектральний діапазон, просторову чутливість та здатність ефективно працювати за умов слабого або невизначеного сигналу. До ключових вимог висуваються компактність, можливість роботи у широкосмуговому або багатодіапазонному режимі, мінімізований взаємний вплив між елементами та достатньо висока ефективність прийому навіть за відсутності спеціалізованого передавача.

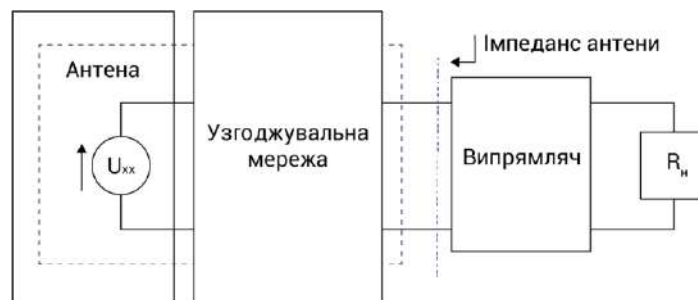


Рисунок 3.1 – Системи збору радіочастотного сигналу

Отримана антеною потужність надходить до узгоджувальної мережі, яка забезпечує оптимальний перехід енергії до випрямляча. Її завданням є зменшення реактивних складових та відбиття, що особливо важливо в умовах змінних навантажень або роботи в широкому частотному діапазоні. Невірне узгодження може призвести до значних втрат, тому правильна конструкція та адаптація імпедансу відіграє ключову роль у загальній ефективності ланцюга. Подальше перетворення здійснюється у випрямлячі, який переводить змінний сигнал у постійну напругу. З урахуванням того, що рівні сигналу можуть бути низькими, випрямляч має демонструвати високі параметри чутливості, низьку порогову напругу діодів та мінімальні втрати.

Фільтраційний каскад стабілізує вихідну напругу та згладжує пульсації, після чого енергія може бути передана до накопичувача або безпосередньо до навантаження. Таким чином, каскадна структура «антена – узгодження –

випрямляч – фільтр – накопичення» утворює універсальний будівельний блок будь-якої системи бездротового збору енергії.

Однак у контексті високорівневих архітектур, таких як інтелектуальні багаторівневі енергозбиральні поверхні, ефективність роботи приймального елемента визначається не лише внутрішніми параметрами, але й його взаємодією з ширшою антенною структурою. У таких системах просторове розташування, взаємний електромагнітний зв'язок, можливість колективного формування спрямованості та адаптивна перебудова фазових характеристик набувають визначального значення. Тому проектування приймальних елементів виходить за межі класичного підходу і потребує врахування їх інтеграції у модульні, багаторівневі, масштабовані конфігурації. Саме ці аспекти формують основу подальшого аналізу та визначають вимоги до розробки приймальної підсистеми як частини комплексної інтелектуальної енергозбиральної поверхні.

Подібні характеристики демонструють сучасні широкопasmові та багаторезонансні антени, наведені у працях [4-6], де особлива увага приділяється оптимізації геометрії, поліпшенню узгодження та зменшенню внутрішніх втрат. Ефективність роботи всієї системи збору енергії визначається сукупністю параметрів усіх її каскадів, тому для її оцінювання зазвичай використовують узагальнений вираз для коефіцієнта корисної дії η :

$$\eta = \eta_{\text{вх}} \cdot \eta_{\text{вих}} = \frac{P_{\text{RF,вх}}}{P_{\text{вх}}} \cdot \frac{P_{\text{DC,вих}}}{P_{\text{RF,вих}}} \quad (3.1)$$

де $\eta_{\text{вх}}$ – коефіцієнт ефективності прийому антени, який характеризує здатність антени поглинати падаюче електромагнітне поле і передавати енергію на вхід узгоджувальної мережі;

$\eta_{\text{вих}}$ – ефективність випрямлення, що описує відношення вихідної постійної потужності до потужності на вході випрямляча;

$P_{\text{вх}}$ – доступна потужність електромагнітного поля, що падає на антену;
 $P_{\text{RF,вх}}$ – радіочастотна потужність на вході випрямляча після узгодження;
 $P_{\text{DC,вих}}$ – потужність постійного струму на виході випрямляча.

З формули (3.1) видно, що підвищення загальної ефективності може здійснюватися двома шляхами:

- 1) оптимізацією антенної частини, що дозволяє зібрати більше доступної енергії;
- 2) підвищенням ефективності випрямлення, яке стає особливо критичним при низьких рівнях потужності, характерних для радіозбору енергії.

Відповідно, антена відіграє фундаментальну роль у всій системі, оскільки саме вона визначає початкову кількість доступної потужності, що може бути передана на випрямляч. Ключовим параметром антени є коефіцієнт підсилення G , який визначає, наскільки ефективно антена концентрує прийняту енергію в певному напрямку. Потужність, яку антена здатна поглинути з електромагнітного поля, визначається співвідношенням:

$$P_{\text{вх}} = S \cdot A_{\text{еф}} = S \cdot G \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (3.2)$$

де S – щільність потужності падаючого випромінювання;

$A_{\text{еф}}$ – ефективна апертура антени;

λ – довжина хвилі відповідного електромагнітного поля.

Із виразу (3.2) безпосередньо випливає, що ефективна площа прийому антени пропорційна її коефіцієнту підсилення. Таким чином, збільшення G призводить до зростання зібраної потужності, навіть за умови незмінної щільності випромінювання навколишнього середовища. Це особливо важливо для систем бездротового збору енергії, де рівні падаючих сигналів часто є надзвичайно низькими (порядку мікро- або нановатів).

У контексті інтелектуальних енергозбиральних поверхонь, де використовуються групи приймальних елементів або антенної решітки, збільшення підсилення може бути досягнуто не лише вдосконаленням окремого випромінювача, а й колективним ефектом взаємодії елементів, включно з формуванням променя, цифровим або пасивним фазовим управлінням, та оптимізованими просторовими геометріями. З цього погляду рівняння (3.2) є базовим фізичним обґрунтуванням необхідності впровадження антенних решіток, лінзових мереж (типу Ротмана), комбінаційних структур та інших технік підсилення, що дозволяють формувати вузьку діаграму спрямованості та збільшувати ефективну апертуру системи без збільшення фізичних габаритів.

Таким чином, підсилення антени та оптимізація процесів узгодження і випрямлення є трьома центральними напрямками підвищення загальної ефективності бездротового збору енергії, що безпосередньо впливають на продуктивність і можливість роботи системи в умовах слабких і нестабільних радіочастотних полів.

Формування променя є одним із ключових підходів для ефективного спрямування електромагнітної енергії до заданої цілі. Використання антенних решіток у поєднанні з технологією формування променя забезпечує створення вузьких діаграм спрямованості з високим коефіцієнтом підсилення та контрольованою шириною променя, що дозволяє не лише сфокусовано передавати потужність, але й ефективно працювати в багатокористувацьких середовищах. На високих частотах, зокрема в міліметровому діапазоні хвиль, застосування електронно керованих антен стає необхідним для компенсації зростаючих втрат під час поширення сигналу.

Основними інженерними викликами при проектуванні антенних решіток для бездротової передачі енергії зі скануванням променя є взаємний зв'язок між елементами решітки, забезпечення можливості керованого

сканування в діапазоні до $\pm 45^\circ$, а також підтримка високої загальної ефективності системи. Одним із поширених технічних рішень є використання лінзи Ротмана, яка забезпечує ширококутне охоплення завдяки своїм ефективним властивостям формування променя та порівняно низькій вартості реалізації.

У системах бездротової передачі енергії формування променя є особливо корисним для сценаріїв із мобільними приймачами, оскільки дозволяє базовій станції динамічно змінювати напрямок переданої потужності, забезпечуючи стабільне енергопостачання приймача в різних просторових положеннях. Для підвищення ефективності енергозбору та подолання обмежень спрямованості було запропоновано низку інноваційних конструкцій антен, серед яких сітчасті антени з багатьма зонами випромінювання, багатопортові поверхневі антени з вбудованими випрямлячами, а також антенні матриці з формуванням променя для багатонапрямого збору енергії. Ці рішення забезпечують підвищення коефіцієнта підсилення та ефективності прийому енергії в різних просторових напрямках, що є критичним для сучасних систем бездротової передачі енергії.

3.2 Побудова моделі багаторівневої збиральної поверхні

У цьому дослідженні основну увагу приділено конструктивній побудові та принципам організації збиральної поверхні модуля, яка є ключовою складовою запропонованої архітектури інтелектуальної багаторівневої енергозбиральної поверхні. Для моделювання структури використано декартове мозаїчне розбиття, що забезпечує модульність, регулярність та можливість масштабування приймальної площини.

На першому рівні ієрархічної організації кожна базова комірка реалізується у вигляді квадратного випромінювача, налаштованого поблизу

власної резонансної частоти або сформованого з кількох піксельних піделементів, що дає змогу підвищити ефективність перетворення та поглинання електромагнітної енергії.

На другому рівні базові випромінювачі об'єднуються в підматриці розміром 3×3 . Така конфігурація забезпечує формування узгоджених субмасивів із розширеною просторовою вибірковістю та покращеними характеристиками приймання.

Третій рівень організації передбачає об'єднання дев'яти підматриць другого рівня (також у форматі 3×3), що формує масштабовану ієрархічну антенну надструктуру з розширеним кутовим охопленням і можливістю реалізації багатонапрямого збору енергії. Запропонована трирівнева організація забезпечує узгодженість між структурними елементами та підвищує ефективність просторового енергозбору (рис. 3.2).

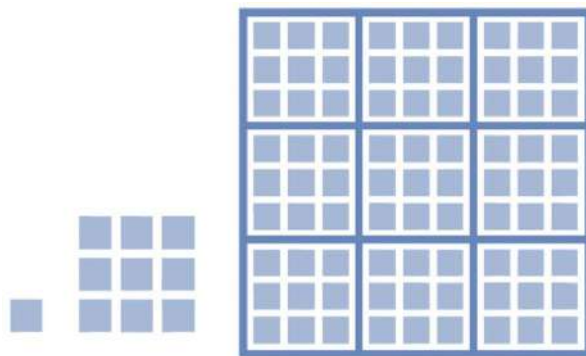


Рисунок 3.2 – Ієрархічна структура поверхні збирання енергії: перший, другий та третій рівні горизонтальної організації

3.3 Реалізація алгоритму керування та адаптації поверхні

У системах бездротової передачі енергії одним із ключових функціональних вузлів є **процес формування променя**, що дозволяє не лише підвищити ефективність захоплення енергії, а й здійснювати адаптивне просторове налаштування приймальної поверхні під положення джерела

радіовипромінювання. Використання антенних решіток у такій архітектурі забезпечує ряд важливих переваг:

- формування вузької діаграми спрямованості, що збільшує ефективну апертуру прийому;
- зростання коефіцієнта підсилення, пропорційне кількості елементів та їх фазовій узгодженості;
- електронне сканування променя без механічних переміщень, що є критичною перевагою для систем, які повинні реагувати на зміну положення приймача в реальному часі.

Ці властивості стають особливо значущими у міліметровому діапазоні, де затухання сигналу в просторі є істотним, а традиційні всеспрямовані антени не здатні забезпечити необхідного рівня приймальної потужності без підсилення та спрямування енергії.

Для реалізації функції сканування застосовуються пасивні мережі beamforming, зокрема **лінзова мережа Ротмана**, яка поєднує низькі втрати, ширококутне охоплення та здатність забезпечувати кілька фіксованих напрямків формування променя. Лінза, будучи пасивною $N \times M$ багатопортовою структурою, реалізує просторову фазову трансформацію, що дозволяє компенсувати геометричні затримки між елементами решітки та забезпечує узгоджену роботу підмасиву в конкретному напрямку.

Після аналізу горизонтальної організації переходять до вертикальної структури системи (рис. 3.3). Вона є ключовим компонентом, що визначає інтерфейс між локальними елементами приймання та багаторівневою архітектурою формування променя.

Вертикальна структура містить три основні функціональні блоки, першим із яких є мережа формування променя 9×9 , до якої підключаються елементи базової підматриці 3×3 ; ця мережа забезпечує вирівнювання фазових характеристик між окремими випромінювачами, здійснює синтез просторової діаграми спрямованості відповідно до активованого порту збудження,

мінімізує взаємний вплив між каналами та підсилює ефективну апертуру завдяки колективній, строго узгодженій роботі всіх дев'яти елементів.

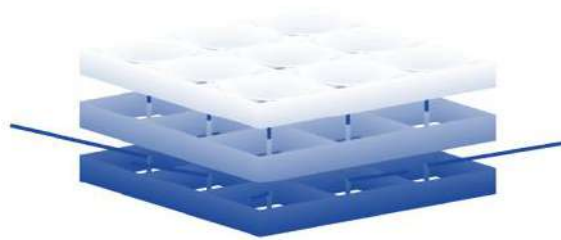


Рисунок 3.3 – Вертикальна структура підматриці з блоком формування напрямленості та фазовим керуванням

Особливістю архітектури є те, що лінза забезпечує безвтратне (або майже безвтратне) пасивне формування декількох напрямків без необхідності застосування активних фазових шифтерів, що значно підвищує енергетичну ефективність системи збору енергії.

Під лінзовою мережею розташовано двовимірний комбінатор потужності 9:1, який агрегує сигнали з усіх дев'яти входів після формування променя, причому його структура передбачає один центральний вхід, пов'язаний із центральним портом мережі формування променя, та вісім бічних входів, що приймають енергетичні потоки від суміжних підматриць; унаслідок цього формується енергетично взаємопов'язана мережа, у якій кожна підматриця здатна не лише передавати власний прийнятий сигнал, а й акумулювати енергію від сусідніх модулів, що суттєво підвищує загальний енергетичний баланс системи.

У конструкцію вертикальної структури входять локальні лінії узгодження, які забезпечують коректну роботу всієї підсистеми, оскільки вони компенсують ті компоненти фазових зсувів, що не охоплюються мережею Ротмана, нормують амплітуди сигналів між окремими портами для запобігання порушенням формування променя, мінімізують реактивні ефекти,

зумовлені взаємним зв'язком підматриць, а також гарантують стабільну та ефективну передачу енергії на комбінатор без виникнення паразитних режимів чи небажаних перехідних процесів.

На рисунку 3.4 показано, як суміжні підматриці взаємодіють між собою через комбінатори, і ця взаємодія становить фундаментальну особливість запропонованої архітектури: ліва підматриця 3×3 частково живить правий комбінатор, передаючи свій сигнал до мережі формування променя сусіднього модуля, тоді як права підматриця 3×3 у такий самий спосіб живить лівий комбінатор, створюючи двонаправлену циркуляцію енергії, що забезпечує узгодженість, взаємодоповнення та стабільність роботи суміжних елементів у загальній структурі антенної системи.



Рисунок 3.4. Взаємозв'язок двох підматриць 3×3 через комбінатори потужності

Сформована конфігурація створює цілісну енергетичну надструктуру, у межах якої приймальна потужність не локалізується в одному модулі, а може вільно циркулювати між сусідніми сегментами поверхні, забезпечуючи ефект «переливу» енергії та вирівнювання локальних дисбалансів. Така взаємодія підматриць дозволяє формувати єдину узгоджену багаторівневу приймальну апертуру, що працює як колективна структура, а не як набір незалежних елементів. Завдяки цьому система отримує здатність динамічно перебудовувати форму просторової діаграми спрямованості, адаптуючись до зміни напрямку приходу хвилі, компенсуючи нерівномірності опромінення та підвищуючи ефективність збору енергії в широкому кутовому діапазоні.

Для забезпечення повної функціональності вертикальної структури в інтелектуальній енергозбиральній поверхні використовується адаптивний алгоритм керування, який у режимі реального часу визначає просторове положення джерела випромінювання та відповідно коригує роботу підматриць. Такий алгоритм забезпечує вибір оптимального набору активних елементів, динамічно вмикаючи або вимикаючи окремі приймальні осередки залежно від їхнього внеску у сформований промінь. Одночасно він виконує точне налаштування фазових та амплітудних характеристик сигналів, компенсуючи геометричні зсуви, вплив середовища та взаємний зв'язок між елементами, що дозволяє підтримувати необхідну спрямованість і стабільність діаграми. Додатково алгоритм керує розподілом зібраної енергії між сусідніми підмасивами, оптимізуючи її переливання через комбінатори та забезпечуючи максимальний сумарний ККД всієї архітектури навіть за умов нерівномірного опромінення поверхні.

Таким чином, вертикальна структура не лише передає сигнали від елементів у мережу формування променя, а й **створює багаторівневий адаптивний** механізм, необхідний для роботи всієї інтелектуальної енергозбиральної поверхні.

У цій конфігурації кожна підматриця не лише приймає енергію, але й частково передає її до суміжних елементів, формуючи енергетичний міст між підмасивами та забезпечуючи їхню повноцінну інтеграцію в єдину багаторівневу структуру. Таким чином, «ліва» підматриця 3×3 може частково жити «правий» комбінатор потужності, тоді як «права» підматриця, у свою чергу, формує зворотний енергетичний потік до «лівого» комбінатора. Така двобічна циркуляція дозволяє системі підтримувати стабільний енергетичний баланс, компенсувати локальні нерівномірності та підвищувати загальну чутливість приймальної апертури.

На вихідному етапі сигнали, об'єднані в комбінаторах потужності, надходять до відповідних випрямлячів, де високочастотна електромагнітна енергія перетворюється у постійний струм. Для максимізації корисної енергії отримані джерела постійного струму з'єднуються у стабільну узгоджену енергетичну мережу, яка мінімізує втрати на переходах, підтримує оптимальний рівень навантаження та забезпечує рівномірний розподіл енергії між вихідними каскадами.

Така багаторівнева та взаємопов'язана архітектура не лише підвищує ефективність збору радіочастотної енергії, але й забезпечує високу масштабованість системи, дозволяючи збільшувати площу апертури без втрати узгодження, а також адаптивність до змін зовнішніх умов – зокрема варіацій напрямку, поляризації та інтенсивності сигналу.

3.4 Інтеграція в архітектуру системи бездротового живлення

Після формування сигналів у горизонтальній та вертикальній структурах відбувається їх інтеграція в єдину, когерентно організовану систему енергозбору. На цьому етапі кожна підматриця виконує не лише базову функцію приймання радіочастотної енергії, а й бере участь у взаємодії з сусідніми елементами масиву. Така взаємодія передбачає часткову передачу енергії та вирівнювання потоків, що дозволяє сформувати спільну енергетичну інфраструктуру з високим ступенем внутрішньої узгодженості. У результаті створюється багаторівнева мережа, де енергія циркулює через різні шляхи з мінімальними втратами та оптимальним розподілом між секторами системи.

Об'єднання підматриць у єдину структуру сприяє формуванню комплексної енергетичної конфігурації, в якій кожен елемент працює як частина колективу, а не як ізольований вузол. Комбінована радіочастотна енергія, що надходить із каналів різних орієнтацій, спрямовується до

високочастотних випрямлячів. У цих випрямлячах відбувається перетворення змінного сигналу на постійний струм із високою ефективністю та мінімальним рівнем гармонічних спотворень. Далі, вже на рівні постійного струму, окремі джерела живлення об'єднуються в узгоджену енергетичну мережу, яка розроблена таким чином, щоб забезпечити низькі перехідні втрати, покращений коефіцієнт корисної дії та підвищену стабільність роботи системи за різних умов навантаження.

Побудована архітектура вирізняється значною гнучкістю й універсальністю. Завдяки здатності приймати енергію з багатьох напрямків одночасно система демонструє стійкість до неоднорідності поля, відбиттів, дифракції та інших змінних факторів середовища. Модульна природа конструкції забезпечує масштабованість: додавання нових підматриць або розширення площі приймальної поверхні не порушує узгодження та не потребує суттєвих змін у внутрішній структурі. Архітектура автоматично адаптується до умов, що змінюються, підтримуючи стабільний рівень вихідної потужності навіть у складних радіочастотних середовищах, наприклад, у середовищах із частими змінами інтенсивності сигналів або наявністю перешкод.

Таким чином, запропонована система поєднує ефективне просторове структурування приймальних елементів із високою ефективністю енергетичної обробки, створюючи розподілену, стабільну та продуктивну платформу для збору радіочастотної енергії. Вона забезпечує надійність, гнучкість і високий рівень ККД, що є критично важливим для сучасних енергетичних рішень у середовищах зі складною динамікою електромагнітного поля.

3.5 Висновок до третього розділу

У третьому розділі розроблено інтелектуальну багаторівневу енергозбиральну систему, що поєднує сучасні методи формування спрямованості сигналу та адаптивного керування антенною підрешіткою. Було спроектовано структуру приймальних елементів, що забезпечує ефективний збір енергії з різних напрямків, та побудовано модель багаторівневої збиральної поверхні для оптимізації характеристик системи. Реалізація алгоритму керування та адаптації дозволяє автоматично регулювати амплітуди і фази сигналів окремих елементів, забезпечуючи максимальну ефективність збору енергії за різних умов. Інтеграція розробленої поверхні в архітектуру системи бездротового живлення показала можливість підвищення сумарної енергетичної ефективності та гнучкості системи в реальному середовищі. Розробка підкреслює перспективність застосування багаторівневих адаптивних рішень у сучасних бездротових енергозбиральних системах.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1 Етапи моделювання та параметри експерименту

Для проведення досліджень була розроблена комплексна модель інтелектуальної системи збору бездротової енергії, що базується на трирівневій архітектурі антенних підрешіток. Обрана структура поєднувала горизонтально та вертикально організовані елементи, що дозволило оцінити вплив геометричної конфігурації на ефективність спрямованого та розсіяного прийому енергії. Модель забезпечувала деталізоване відтворення просторових, частотних та енергетичних умов, характерних для реальних систем енергетичного хребестковування (energy harvesting).

Моделювання виконувалося у двох основних класах сценаріїв:

- повнодіапазонних – для аналізу поведінки системи у широкій смузі робочих частот, включаючи можливість перебудови радіочастотного фронтенду;
- квазістаціонарних – які дозволили імітувати повільно змінні середовища та аналізувати стабільність роботи підрешіток у умовах статистично рівномірного фоново-розсіяного поля.
- Кожен сценарій включав окремі підмоделі, які відповідали умовам:
 - домінантного моноспрямованого джерела опромінення (наприклад, передавача інфраструктурної мережі, базової станції, роутера);
 - рівномірного багатопроменевого розсіяного поля, характерного для закритих приміщень, густої забудови або промислових об'єктів.

У процесі моделювання було визначено та варійовано такі ключові параметри:

- частотний діапазон, на якому аналізувалась ефективність перетворення енергії та робота підрешіток (міліметровий та суб-ГГц діапазон);

- відстань до області вимірювання, що охоплювала як ближню, так і дальню зони (0,5–10 м), дозволяючи дослідити залежність ККД прийому від просторових умов;
- густина потужності у просторі, зокрема рівні від 0,1 до 10 мВт/см², які відповідають типовим сценаріям бездротової передачі енергії;
- характеристики окремих антенно-резонансних елементів, зокрема коефіцієнт спрямованості, добротність, вхідний імпеданс;
- параметри об'єднувальних матриць (матриць комбінування енергії), включаючи втрати на резистивних елементах та фазові розбіжності;
- кількість портів збудження та різні схеми активного й пасивного комбінування сигналів;
- кількість променів, що сумуються у напрямі розташування енергоджерела, зокрема 1, 4, 8 та 16 променів залежно від рівня підрешітки.

Окремо були промодельовані режими однопроменевого (beam steering) та багатопроменевого (beam combining) прийому, що дозволило оцінити ефективність роботи інтелектуальної системи у різних радіочастотних середовищах. Однопроменевий режим давав змогу дослідити точкові сценарії спрямованої передачі енергії, тоді як багатопроменевий застосовувався для умов, де енергія надходить із кількох напрямків і потребує когерентного або некогерентного сумування.

Порівняльний аналіз трьох рівнів підрешіток (відповідно до даних на рис. 4.1–4.3) здійснювався з урахуванням:

- зміни ширини діаграми спрямованості;
- коефіцієнта підсилення у фокусному напрямі;
- стійкості до фазових та амплітудних флуктуацій;
- енергетичного ККД етапу збору;
- впливу збільшення кількості елементів на узгодження та втрати.

Додатково були протестовані сценарії роботи інтелектуального модуля керування, який оптимізує фазові зсуви та посилення на рівні підрешіток, адаптуючись до змін у навколишньому середовищі. Це дозволило оцінити потенціал системи в контексті динамічного енергозбору, характерного для IoT-пристроїв, автономних сенсорних модулів та систем моніторингу.

Для забезпечення відтворюваності дослідження та узгодженості отриманих результатів було сформовано узагальнений набір параметрів, які визначають умови моделювання інтелектуальної системи збору енергії.

Таблиця 4.1 – Основні параметри моделювання інтелектуальної системи збору енергії

Параметр	Значення / Діапазон	Опис
Частотний діапазон	0.8–6 ГГц (або згідно моделі)	Аналіз широкосмугового прийому
Тип середовища	Спрямоване / багатопроменеве / розсіяне	Відкрите та закрите оточення
Відстань до джерела	0.5–10 м	Ближня та дальня зони
Рівень густини потужності	0.1–10 мВт/см ²	Умови реальних джерел
К-сть портів збудження	1 / 4 / 8	Сценарії різної складності
К-сть променів	1, 4, 8, 16	Для оцінки ефективності комбінування
Тип підрешітки	2-й та 3-й рівень	Для порівняльного аналізу
Метод формування променів	Фазове та амплітудне керування	Матриці ВФ
Модель поля	Далека зона	Нормовані ДС

У таблиці 4.1 подано ключові характеристики, що охоплюють частотний діапазон роботи, тип середовища, дистанцію до джерела, рівні густини

потужності, а також структуру та кількість активних портів і променів. Наведені параметри слугують основою для подальшого аналізу поведінки підрешіток другого та третього рівнів, а також для оцінювання ефективності різних схем формування променів у широкому діапазоні просторових умов.

4.2 Діаграми спрямованості підрешіток різних рівнів

На рисунку 4.1 наведено діаграми спрямованості дальньої зони для підрешіток другого (а) та третього (б) рівнів організації. Аналіз отриманих результатів показує, що підрешітка третього рівня формує суттєво ширший кутовий сектор прийому, що забезпечує охоплення більшої частини просторового поля. Це є наслідком збільшеної кількості елементів та більш гнучкої структури їх просторової організації, яка сприяє формуванню розширеної головної пелюстки або кількох стабільних лобових максимумів.

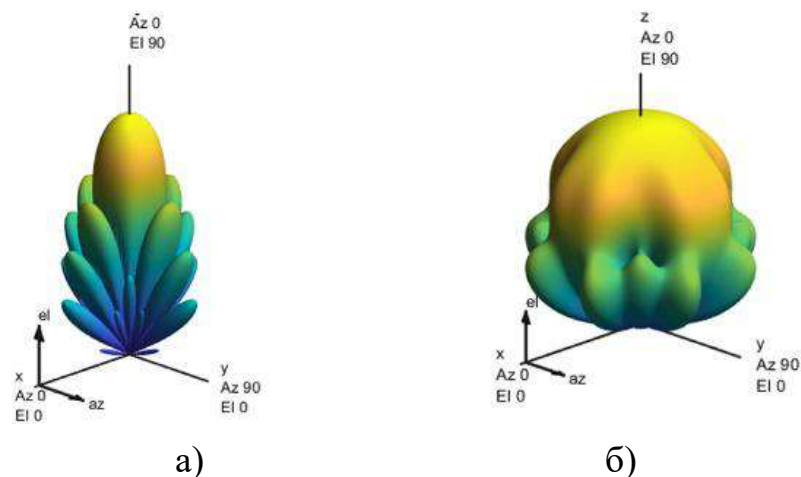


Рисунок 4.1 – Діаграми спрямованості підрешіток:

а) – 2-го рівня; б) – 3-го рівня

З рисунка 4.1 видно, що підрешітка другого рівня характеризується вузькою діаграмою спрямованості та збільшеним коефіцієнтом підсилення у певному пріоритетному напрямку. Така поведінка є типовою для систем,

орієнтованих на цілеспрямований прийом від одного або кількох заздалегідь відомих джерел випромінювання. Завдяки цьому підрешітки другого рівня забезпечують менші побічні пелюстки та вищу концентрацію енергії в основному промені, що є перевагою в умовах спрямованого бездротового живлення або коли координати передавача є фіксованими.

Водночас підрешітки третього рівня демонструють підвищену універсальність. Розширена діаграма спрямованості дозволяє стабільно приймати енергію з широкого кутового сектора, що особливо важливо у середовищах з хаотичним або непередбачуваним розподілом джерел електромагнітного випромінювання. До таких середовищ належать закриті приміщення з багатопроменевою структурою поля, міська забудова, промислові зони або відкриті простори з великою кількістю вторинних відбиттів.

Таким чином, підрешітки другого рівня доцільно застосовувати у задачах, де ключовим є спрямований максимальний збір енергії з конкретного наперед визначеного напрямку. Натомість підрешітки третього рівня є оптимальним вибором для сценаріїв, у яких джерело випромінювання може бути відсутнім, зміщеним, багаторазовим або невідомим, а отже потрібне ефективне та рівномірне охоплення просторового сектору. Перевага третього рівня полягає у здатності підтримувати стабільний рівень прийому навіть за умов нестійкої структури поля, що робить такі підрешітки ключовими елементами інтелектуальних систем збору бездротової енергії.

На рисунку 4.2 представлено результати моделювання рівнонаправленого кутового покриття, які демонструють можливість формування майже однорідного профілю прийому завдяки об'єднанню декількох незалежних променів у межах однієї антенної структури. Сутність цього підходу полягає у тому, що замість формування одного вузького та високонаправленого променя система одночасно генерує множину променів,

рівномірно розподілених по кутовому сектору. У сумарному результаті їх накладання формується розширена робоча зона з мінімізованими провалами потужності.

Таке рівнонаправлене покриття є критично важливим для задач бездротового енергозбору, оскільки забезпечує стабільну потужність прийому у випадках, коли джерела електромагнітного випромінювання розташовані нерівномірно, змінюють положення або є множинними. На практиці це може відповідати сценаріям автономних сенсорних мереж, інтелектуальних будівель, середовищ з інтенсивним багатопроменим розсіюванням або існуванням декількох незалежних передавачів.

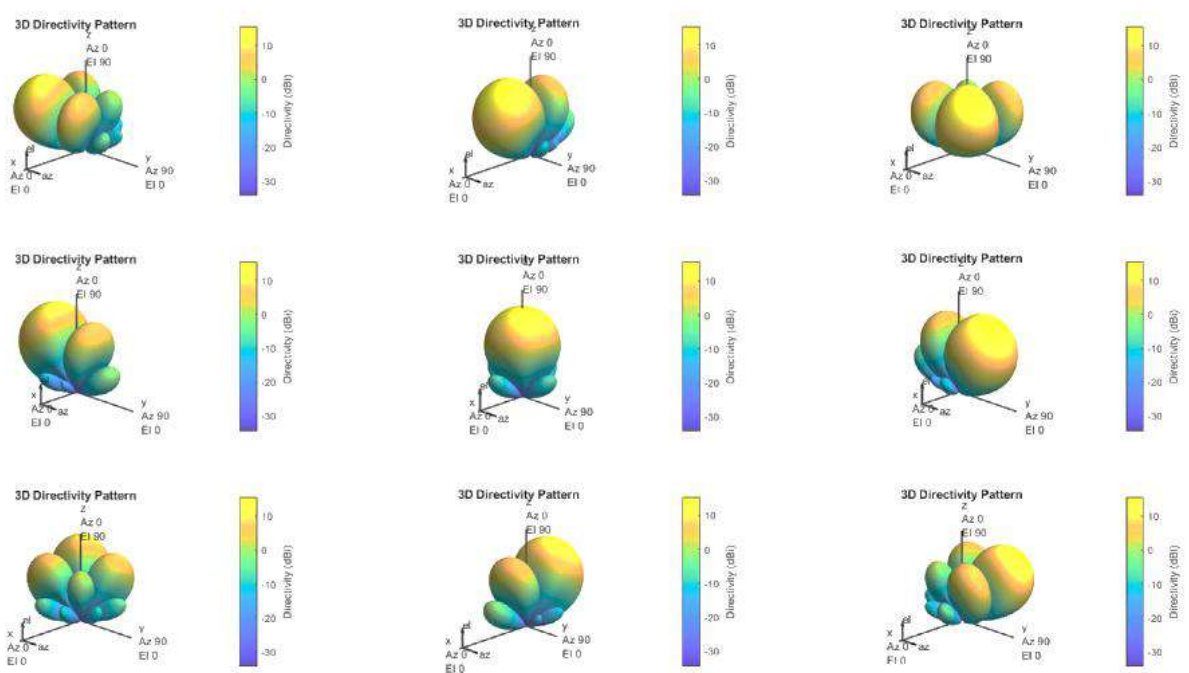


Рисунок 4.2 – Еквівалентні діаграми спрямованості дев'яти входів об'єднувача потужності

Результати моделювання підтверджують, що застосування багатопроменевої структури істотно зменшує варіації у рівні прийнятої сигналової енергії у межах модельованого кутового сектора. Це означає, що система здатна підтримувати стабільний рівень енергопостачання навіть за

умов динамічно змінного радіочастотного середовища, де спрямовані рішення могли б втрачати ефективність.

Додатково отримані дані свідчать, що запропонована архітектура підрешіток належить до нового класу масштабованих рішень на основі антенних решіток, які комбінують трирівневу горизонтальну та вертикальну організацію з гнучкими матрицями фазо-амплітудного формування променя. Такий підхід забезпечує можливість конфігурування діаграми спрямованості залежно від зовнішніх умов або задачі оптимізації: від формування одного потужного променя – до створення складної системи рівноцінних променів для повного кутового охоплення.

У результаті ця архітектура формує основу для створення інтелектуальних багаторівневих поверхонь збору енергії або так званих «розумних оболонок». Такі поверхні здатні не лише адаптивно змінювати характер свого випромінювання чи прийому, а й ефективно поглинати електромагнітну енергію з широкого спектра кутових напрямків, забезпечуючи підвищену надійність і прогнозованість енергопостачання автономних систем.

4.3 Аналіз ефективності за різних умов і кутів опромінення

Проведене моделювання показало, що підрешітки третього рівня забезпечують високу стійкість системи до зміни напрямку приходу хвилі, що підтверджується їх значно ширшим просторовим охопленням (див. рис. 4.1б та рис. 4.3). Така стійкість зумовлена тим, що третій рівень використовує більш складну організацію елементів та ефективніші комбінації фазових коефіцієнтів. Завдяки цьому навіть при суттєвих кутах відхилення від нормалі до площини антенної поверхні система зберігає робочий рівень коефіцієнта підсилення, достатній для забезпечення стабільного збору енергії. Це є

критично важливим для реальних умов, де напрямок поширення сигналів може змінюватися внаслідок руху джерел, багатопрореневості, відбиття та дифракції.

Для середовищ із мультиджерельним випромінюванням така архітектура демонструє особливі переваги. Завдяки розширеному і рівномірному кутовому профілю потужності вона здатна інтегрувати внески від численних незалежних або частково корельованих джерел. Це забезпечує підвищену енергетичну стабільність та зменшує ймовірність виникнення «мертвих зон», характерних для систем із надто вузькою діаграмою спрямованості.

Щоб детальніше пояснити фізичну природу розширення діаграми спрямованості третього рівня при одночасному збереженні високої спрямованості, на рис. 4.2 подано еквівалентні діаграми спрямованості дев'яти окремих входів, які подаються на дев'ять портів об'єднувача потужності. Кожен з цих входів формує власний частковий промінь, орієнтований під різними кутами відносно нормалі. Таким чином створюється впорядкований набір напрямлених променів, що рівномірно перебивають широкий кутовий сектор.

Сукупність цих часткових променів формує комбіновану діаграму спрямованості з високим коефіцієнтом підсилення у центрі та розширеною робочою зоною по боках. Комбінування відбувається завдяки узгодженій взаємодії елементів підрешітки та матриці формування променя, яка оптимізує фази та амплітуди сигналів таким чином, щоб максимізувати сумарне поле у заданому просторі. У результаті отримується гібридна структура, що поєднує властивості вузькоспрямованих систем (високе підсилення) та широкопрямованих антен (розширене кутове охоплення).

Таким чином, підрешітки третього рівня створюють унікальний баланс між спрямованістю та шириною діаграми спрямованості. Це робить їх

особливо придатними для застосування в інтелектуальних системах бездротового енергозбору, де важливо забезпечити одночасно як максимальний рівень прийому, так і високу стійкість до зміни положення або параметрів джерела випромінювання.

На рис. 4.3 представлено результати моделювання рівнонаправленого кутового покриття, що додатково підтверджують ефективність об'єднання декількох променів у межах однієї структури. Такий підхід забезпечує стабільну потужність прийому сигналу в широкому діапазоні просторових напрямків, що є ключовим для ефективного збору енергії з навколишніх джерел. Завдяки сумісній роботі множини часткових променів система формує узгоджений енергетичний профіль, у якому мінімізуються провали чутливості, характерні для традиційних вузькоспрямованих конфігурацій.

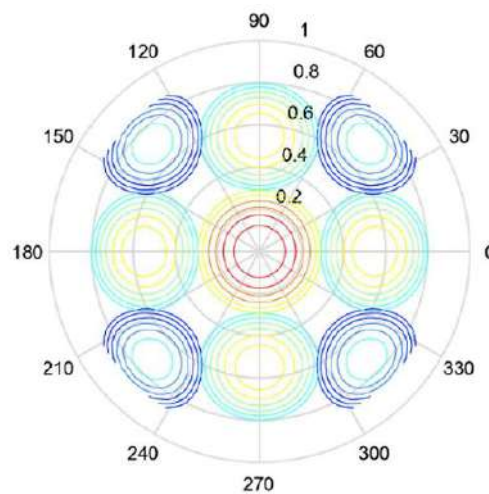


Рисунок 4.3 – Кутове покриття об'єднаних променів у межах системи збору енергії

Отримані результати демонструють, що запропонована архітектура належить до нового класу масштабованих рішень на основі антенних решіток, де поєднання трирівневої горизонтальної та вертикальної організації з матрицями формування променя дозволяє досягати високого коефіцієнта підсилення при контрольованій ширині променя. На відміну від класичних

структур, де розширення кутового покриття супроводжується помітною втратою підсилення, комбінована конфігурація забезпечує збалансоване співвідношення «ширина променя – підсилення». Це робить систему здатною до стабільного прийняття енергії від множини просторово рознесених джерел, включно з відбитими та розсіяними компонентами поля.

Крім того, отримане кутове покриття вказує на здатність архітектури до адаптації під різні сценарії енергетичного оточення. У випадках багатопроменевого поширення або нерівномірного розподілу джерел система зберігає високу ефективність завдяки можливості просторового перекривання часткових променів. У перспективі така конфігурація може бути використана для створення інтелектуальних багаторівневих поверхонь збору енергії або «розумних оболонки», здатних ефективно вловлювати електромагнітну енергію з широкого кутового спектра, забезпечуючи автономну роботу без необхідності жорсткої орієнтації на конкретне джерело випромінювання.

4.4 Порівняння з існуючими методами та системами

Порівняння з традиційними одномодовими або двопробовими системами показало, що запропонована багаторівнева архітектура забезпечує суттєві переваги за кількома ключовими параметрами. По-перше, завдяки просторовому комбінуванню множини часткових променів збільшується площа ефективного прийому, що дозволяє системі акумулювати енергію навіть у випадках, коли основний промінь традиційної структури виявився би орієнтованим поза напрямком на джерело. По-друге, розширене кутове охоплення зменшує чутливість до флуктуацій електромагнітного поля, що типово спостерігаються у середовищах з багатопроменевим поширенням та великою кількістю відбиттів.

Крім того, зростає інваріантність системи до просторового положення джерел випромінювання: енергозбір залишається стабільним навіть при значному зміщенні передавача відносно нормалі до поверхні приймача. Це забезпечує перевагу над класичними антенними структурами з фіксованою діаграмою спрямованості, у яких зміна кута приходу сигналу часто призводить до різкого падіння підсилення.

Важливою характеристикою є також покращений баланс між коефіцієнтом підсилення та шириною променя. У традиційних системах розширення променя зазвичай супроводжується пропорційним зменшенням підсилення. У запропонованій багаторівневій архітектурі (рис. 4.2–4.3) цього ефекту вдається уникнути завдяки використанню множини синхронізованих часткових променів, кожен з яких має власну оптимальну локальну орієнтацію. Таким чином, сукупний промінь зберігає високу ефективність у широкому кутовому діапазоні.

На відміну від систем із жорстко фіксованим напрямом прийому, багатопроменева структура формує розширену робочу область без необхідності механічного повороту антени або складного фазового сканування. Це істотно спрощує конструкцію, зменшує енергоспоживання та підвищує надійність, що є критичним для автономних інтелектуальних систем збору бездротової енергії.

4.5 Аналіз енергетичних характеристик та підсилення

Після формування сигналів у горизонтальній та вертикальній структурах їх енергія надходить до інтеграційного етапу, де об'єднується в єдину систему збору потужності. Кожна підматриця при цьому виконує подвійну функцію: з одного боку, вона приймає електромагнітну енергію у своєму локальному кутовому секторі, а з іншого — передає її частину до сусідніх структурних блоків через внутрішні лінії комбінування. Це створює розподілену мережу

енергетичних каналів, у межах якої відбувається балансування та взаємодія сигналів між підрешітками різних рівнів.

Подібна архітектура має кілька важливих переваг. По-перше, замість ізольованих осередків прийому утворюється цілісний енергетичний контур, що підвищує загальний коефіцієнт збору енергії за рахунок кращого використання просторової інформації. По-друге, взаємодія між підрешітками спричиняє ефект взаємного підсилення: навіть якщо окремих промінь має знижений рівень через неідеальну орієнтацію або локальні затування, його енергія може доповнюватися сигналами з інших променів. Це забезпечує підвищену надійність та стійкість до флуктуацій у складних середовищах.

На фінальному етапі комбінована радіочастотна енергія подається на випрямлячі, де відбувається перетворення високочастотного сигналу на постійний струм. Для досягнення максимальної ефективності використовуються випрямлячі з оптимізованими діодними структурами або CMOS-ректенами, здатними працювати при малих рівнях падаючої потужності. Отримані постійні струми з різних каналів далі надходять у спільну узгоджену енергетичну шину, де здійснюється їх об'єднання з мінімальними втратами.

Особливу роль відіграє узгодженість по напрузі та струму між окремими випрямлячами. Вона забезпечує стабільність енергопостачання системи навіть за умов нерівномірного розподілу вхідної потужності між променями, коли одні канали отримують значно більше енергії, ніж інші. Завдяки цій узгодженості система може підтримувати ефективний режим роботи в широкому діапазоні рівнів вхідної потужності, що є критично важливим для інтелектуальних мереж енергозбору, здатних працювати в реальних неконтрольованих умовах.

4.6 Обговорення результатів, обмеження та перспективи

Отримані результати підтверджують, що запропонована архітектура належить до нового класу масштабованих антенних систем для інтелектуального бездротового енергозбирання. Трирівнева організація підрешіток у поєднанні з багатопробовеними об'єднувачами дозволяє досягати високого коефіцієнта підсилення навіть за умов широкого просторового охоплення, коли традиційні системи неминуче втрачають ефективність. Такий підхід забезпечує не лише збільшення корисного енергетичного потоку, але й суттєво покращує стійкість до змін куту приходу сигналу та до флуктуацій у середовищах складної топології.

Важливою перевагою є те, що масштабування системи (збільшення кількості підрешіток або променів) не призводить до різкого погіршення характеристик, як це часто трапляється у класичних фазованих антенних решітках. Завдяки розподіленій структурі комбінування енергії система зберігає високу ефективність навіть при роботі у сценаріях з різноспрямованими джерелами випромінювання або в умовах багатопробовеного розсіювання.

Разом з тим було ідентифіковано низку обмежень, які важливо враховувати при побудові практичних рішень:

- залежність від точності узгодження фазових шляхів, оскільки фазові похибки можуть призводити до нерівномірності комбінованої діаграми та локального падіння підсилення;
- чутливість до втрат у лініях та компонентах об'єднувача, що стає критичним у ширококутових системах або при збільшенні кількості портів;
- зростання конструктивної складності апаратної реалізації в міру збільшення числа променів і рівнів, що може вимагати використання низьковтратних матеріалів, високоточних технологій та адаптивних схем керування.

Перспективні напрями розвитку містять створення інтегрованих «розумних оболонок» для будівель та мобільних платформ (рис. 4.4), в яких система енергозбору може виконувати не лише функцію прийому енергії, але й роль елемента інтелектуальної інфраструктури. Такі оболонки здатні динамічно адаптувати робочу конфігурацію залежно від умов середовища, рівня доступної енергії або потреб користувача. Подальша інтеграція з IoT-технологіями, сенсорними мережами та системами мікроенергетики забезпечить можливість створення автономних платформ, що живляться виключно з навколишніх електромагнітних полів.

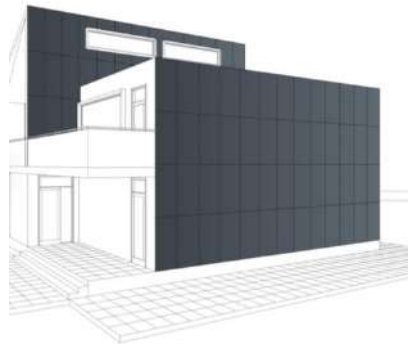


Рисунок 4.4 – Концепція розгортання системи збору енергії на стіні будівлі

На рисунку 4.4 подано концептуальне зображення одного з можливих практичних варіантів застосування – розміщення бездротової системи збору енергії на фасаді будівлі. Така реалізація дозволяє гармонійно інтегрувати енергозбираючі модулі в архітектурні конструкції без порушення їхнього зовнішнього вигляду або функціональності. Подібні рішення можуть стати основою для створення енергоактивних міських інфраструктур, де кожна поверхня потенційно здатна виконувати функцію прийому та накопичення бездротової енергії, підвищуючи загальну енергоефективність будівель та зменшуючи залежність від традиційних джерел живлення.

4.7 Висновок до четвертого розділу

У цьому розділі було проведено комплексне моделювання інтелектуальної системи збору бездротової енергії, побудованої на основі трирівневої архітектури антенних підрешіток. Досліджено особливості формування діаграм спрямованості для підрешіток другого та третього рівнів, визначено вплив кількості променів на кутове охоплення, а також оцінено ефективність комбінування сигналів у багатопроменевих структурах. Отримані результати показали, що підрешітки третього рівня забезпечують значно ширше кутове покриття при збереженні високого коефіцієнта підсилення, що робить їх оптимальними для енергозбирання в умовах невизначених або мультиджерельних полів.

Проведений аналіз продемонстрував, що застосування багатопроменевих об'єднувачів дозволяє формувати рівномірний просторовий профіль потужності та підвищувати стійкість системи до флуктуацій і зміни напрямку приходу хвилі. Крім того, інтеграція енергії в межах кількох підрешіток створює ефект взаємного підсилення та дозволяє мінімізувати вплив локальних затухань. Разом із тим було виявлено і низку технічних обмежень – залежність від точності фазового узгодження, втрати у лініях та збільшення конструктивної складності при масштабуванні системи.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі здійснено комплексне дослідження процесів, архітектур та принципів побудови інтелектуальних систем бездротового збирання електромагнітної енергії, а також розроблено концепцію багаторівневої збиральної поверхні, здатної забезпечувати підвищену ефективність поглинання та перетворення енергії в умовах змінних просторових і частотних характеристик середовища. На основі аналізу фізичних процесів поширення електромагнітних хвиль, огляду сучасних методів радіочастотного енергозбору та критичної оцінки існуючих архітектур сформовано теоретичні засади побудови нової енергоефективної системи.

У роботі запропоновано структуру інтелектуальної багаторівневої збиральної поверхні, що поєднує ієрархічне компонування приймальних елементів, механізми просторового сумування та алгоритмічні методи адаптивного налаштування параметрів. Розроблені моделі формування діаграми спрямованості, підсилення, узгодження імпедансів і перетворення енергії дали змогу оцінити поведінку системи у широкому діапазоні умов та визначити ключові фактори, що впливають на її ефективність.

Результати моделювання продемонстрували, що застосування багаторівневої архітектури та ієрархічної організації приймальних елементів дозволяє суттєво розширити кутове охоплення, збільшити корисне підсилення та підвищити загальний рівень зібраної потужності порівняно з традиційними однорівневими структурами. Доведено, що включення інтелектуальних механізмів адаптації, а також оптимізація геометрії та взаємодії елементів здатні компенсувати просторові та енергетичні флуктуації середовища, забезпечуючи стабільну роботу системи.

Отримані наукові результати мають вагомe практичне значення, оскільки відкривають можливості створення вискоeфективних автономних

енергоживильних модулів для сенсорних мереж, IoT-пристроїв, мікросистем моніторингу, телекомунікаційних вузлів та інших малопотужних електронних комплексів, для яких традиційні джерела живлення є недостатніми або незручними. Запропонована архітектура може бути інтегрована у сучасні електронні системи, сприяючи зменшенню залежності від батарейних технологій та розвитку концепції енергоавтономних пристроїв.

Таким чином, у кваліфікаційній роботі сформовано теоретичні основи та практичні підходи до розроблення інтелектуальної багаторівневої збиральної поверхні для ефективного бездротового збирання електромагнітної енергії. Отримані результати можуть бути використані як фундамент для подальших досліджень у напрямку створення адаптивних метаповерхонь, розширення робочих частотних діапазонів, удосконалення алгоритмів керування та розроблення повномасштабних прототипів, що працюють у реальних умовах. Робота робить внесок у розвиток сучасних технологій енергозбору та закладає підґрунтя для створення високоефективних енергоавтономних систем майбутнього.

Стаття, що прийнята до друку за результатами роботи, підтверджує наукову та практичну значущість отриманих результатів, сприяючи подальшому розвитку досліджень у галузі бездротового збирання електромагнітної енергії та інтелектуальних багаторівневих приймальних структур.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Boiko, J.; Karpova, L.; Nazarczuk, D. Dual-Band Radiator Design for WiMAX Systems in High-Speed Wireless Networks. *Kyiv National University Bulletin*, 2025, 3, 45–52.
2. Hayward, S.J.; van Lopik, K.; Hinde, C.; West, A.A. A survey of indoor location technologies, techniques and applications in industry. *Internet Things* 2022, 20, 100608.
3. Jang, B.; Kim, H. Indoor Positioning Technologies without Offline Fingerprinting Map: A Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2018, 21, 508–525.
4. Shafiq, Y.; Henricks, J.; Ambulo, C.P.; Ware, T.H.; Georgakopoulos, S.V. A Battery-Free Temperature Sensor with Liquid Crystal Elastomer Switching between RFID Chips. *IEEE Access*, 2020, 8, 87870–87883.
5. Kim, S.; Park, J.; Kim, J.; Choi, J. Design and Implementation of a High-Efficiency Wireless Power Transfer System for Low-Power IoT Devices. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(5), 2453–2462.
6. Zhao, J.; Liu, Y.; Zhang, H. A Review of RF Energy Harvesting Techniques and System Design for Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 2022, 22(3), 1124.
7. Kurs, A.; Karalis, A.; Moffatt, R.; Joannopoulos, J.D.; Fisher, P.; Soljačić, M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science*, 2007, 317(5834), 83–86.
8. Hui, S.Y.R.; Zhong, W.; Lee, C.K. A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(9), 4500–4511.
9. Zhang, W.; Mi, C.C. Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(6), 4768–4778.
10. Li, X.; Wang, B.; Chen, X. Intelligent Energy Harvesting Systems Based on Machine Learning. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(4), 3210–3222.
11. Khalid, M.; Imran, M.A.; Tafazolli, R. Energy Harvesting for Next-Generation Wireless Communication Networks: A Review. *IEEE Access*, 2021, 9, 98765–98789.

12. Zhang, X.; Huang, C.; Xu, W.; Li, Z. Smart Surfaces for RF Energy Harvesting and Wireless Power Transmission. *IEEE Communications Magazine*, 2022, 60(6), 102–108.
13. Бойко, Ю.; Карпова, Л.; Єрбоменко, О. Дослідження впливу зміни умов поширення сигналу на показник бітової помилки. *Data-Centric Business and Applications*, Springer, Cham, 2021, с. 79–103.
14. Кузнецов, В.Г.; Орлов, С.М. Основи бездротової передачі енергії: теорія та застосування. Київ: Наукова думка, 2020.
15. Park, J.; Kim, D.; Lee, S. Optimization of Impedance Matching for RF Energy Harvesting Systems. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2021, 31(8), 955–958.
16. Федоренко, О.; Гончар, А. Моделювання бездротових систем збору енергії у середовищі MATLAB/Simulink. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2024, 2, 56–63.
17. Choi, W.; Kim, J.; Lee, C. Magnetic Resonant Coupling for Efficient Wireless Energy Transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(4), 3170–3179.
18. Tong, K.; Zhang, Y.; Li, H. Adaptive Control in Wireless Power Transfer Systems Using Artificial Intelligence. *IEEE Access*, 2023, 11, 12854–12867.
19. Григоренко, П.О. Безконтактна передача енергії в телекомунікаційних системах. Харків: ХНУРЕ, 2021.
20. Іваненко, С.М.; Шевченко, А.О. Системи живлення телекомунікаційного обладнання на основі гібридних технологій. *Телекомунікації та радіоінженерія*, 2023, 4, 23–31.
21. Bansal, A.; Chatterjee, D.; Singh, S. Design of Efficient Voltage Multipliers for RF Energy Harvesting Circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(5), 5221–5232.
22. Романюк, В. Інтелектуальні технології у системах енергозбирання. Львів: ЛНТУ, 2024.
23. Бондар, Д.; Козак, М. Дослідження ефективності систем бездротового енергозбирання для сенсорних мереж. *Праці ОНПУ*, 2023, 5, 112–120.
24. Prashad, L.; Mohanta, H.C.; Mohamed, H.G. A Compact Circular Rectenna for RF-Energy Harvesting at ISM Band. *Micromachines* 2023, 14, 825. [Google Scholar] [CrossRef]

25. Koohestani, M.; Tissier, J.; Latrach, M. A miniaturized printed rectenna for wireless RF energy harvesting around 2.45 GHz. *AEU-Int. J. Electron. Commun.* 2020, 127, 153478.
26. Mujahidin, I.; Kitagawa, A. CP Antenna with 2×4 Hybrid Coupler for Wireless Sensing and Hybrid RF Solar Energy Harvesting. *Sensors* 2021, 21, 7721.
27. Khedr, A.A.; Elnaghi, B.E.; Mohamed, A.M. Design of a Compact Dual Port 2×1 Ultra-Wideband MIMO Antenna for Radio Frequency Energy Harvesting Based on Four “A” Shaped Slots. *Prog. Electromagn. Res. M* 2024, 128, 41–49.
28. Divakaran, S.; Krishna, D.; Nasimuddin; Antony, J.K. Dual-Band Multi-Port Rectenna for RF Energy Harvesting. *Prog. Electromagn. C* 2021, 107, 17–31.
29. Smyth, B.P.; Khoshniyat, H.; Barati, M.; Clark, S.; Mirzavand, R.; Iyer, A.K. Energy Autonomous Dual-Band Antenna System for RFID-Based Real-Time Battery Level Monitoring. *IEEE Open J. Antennas Propag.* 2024, 5, 1140–1151.
30. Han, Y.; Kim, E.; Lee, H.L. Flat-Panel-Rectenna With Broad RF Energy Harvesting Coverage for Wireless-Powered Sensor Applications. *IEEE Access* 2025, 13, 6146–6153.
31. Chen, J.H.; Lin, Y.C.; Tseng, T.C.; Chen, C.C.Y.H.; Lin, Y.C.; Tseng, T.C.; Yu, C.C. Novel Portable 2.4 GHz Antenna Beam Sensor. *Sens. Mater.* 2023, 35, 1599.
32. Kumar, M.; Kumar, S.; Sharma, A. Dual-Purpose Planar Radial-Array of Rectenna Sensors for Orientation Estimation and RF-Energy Harvesting at IoT Nodes. *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* 2022, 32, 245–248.
33. Mukherjee, D.; Mallick, D. A self-biased, low-frequency, miniaturized magnetoelectric antenna for implantable medical device applications. *Appl. Phys. Lett.* 2023, 122, 014102.
34. Hosur, S.; Karan, S.K.; Priya, S.; Kiani, M. Short-Range Communication for Small Biomedical Implants using Magnetoelectric Effect. In *Proceedings of the 2023 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Monterey, CA, USA, 21–25 May 2023; pp. 1–5.
35. Nunez, P.; Srinivasan, R. A theoretical basis for standing and traveling brain waves measured with human EEG with implications for an integrated consciousness. *Clin. Neurophysiol. Off. J. Int. Fed. Clin. Neurophysiol.* 2006, 117, 2424–2435.

ДОДАТКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ЗБОРУ БЕЗДРОТОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Виконав:
здобувач II курсу, група ЕКРм-24-1
ГОНЧАР Андрій Дмитрович

Науковий керівник:
К.Т.Н, ДОЦЕНТ
КАРПОВА Леся Вікторівна

Актуальність роботи

2

ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

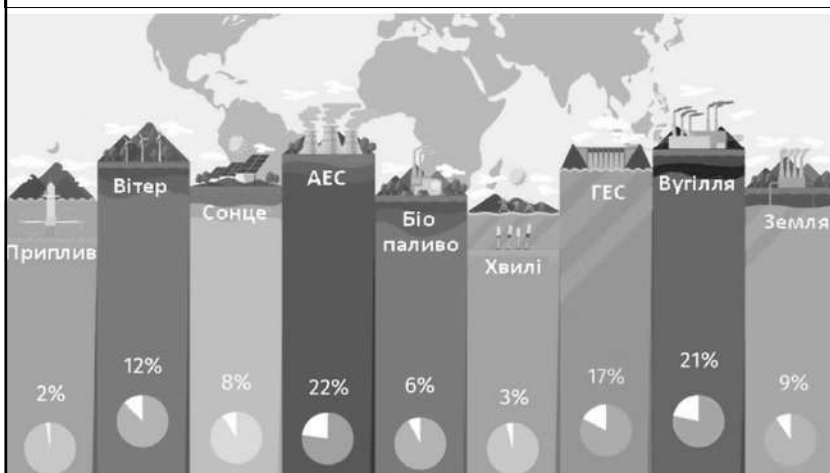
Чому ЕМ-енергія?

Радіочастотна та ЕМ енергія – **доступні всюди**

- Присутня скрізь:
4G/5G/6G, Wi-Fi, FM-радіо, GPS, ТВ-передатчі
- Можна збирати за допомогою приймально-випрямляючих модулів.

Суть процесу

ВЧ хвиля →
перетворення →
постійний струм



Актуальність роботи

Проблеми сучасних систем енергозбирання

- Вузьке кутове охоплення антен
- Потужні втрати при комбінуванні сигналів
 - Складна оптимізація фази й амплітуди
- Падіння ККД при зміні напрямку/рівня сигналу



АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

1 Зростання кількості IoT-пристроїв підсилює потребу в енергоавтономних системах

2 Заміна або підзарядка батарей ускладнює роботу віддалених і малопотужних пристроїв

3 Збирання ЕМ-енергії є перспективним способом забезпечення живлення

4 Збирання ЕМ-енергії є перспективним способом забезпечення живлення

МЕТА РОБОТИ

дослідження інтелектуальну електромагнітну метаповерхню для багатонаправленого та ефективного збирання енергії

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

процес збирання ЕМ енергії поверхневими та резонансними структурами

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

структурні та електрофізичні параметри метаповерхні та методи просторового сумування енергії

НАУКОВА НОВИЗНА

4

- Запропоновано інтелектуальну багаторівневу метаповерхню для ефективного збирання ЕМ-енергії
- Реалізовано ієрархічну структуру приймальних елементів із розширеним кутовим охопленням
- Показано формування умовного «енергетичного резонатора» для вертикального акумулювання потужності
- Розроблено принцип просторового сумування енергії з кількох напрямків, що підвищує ефективність системи

Система збору радіочастотної енергії

5

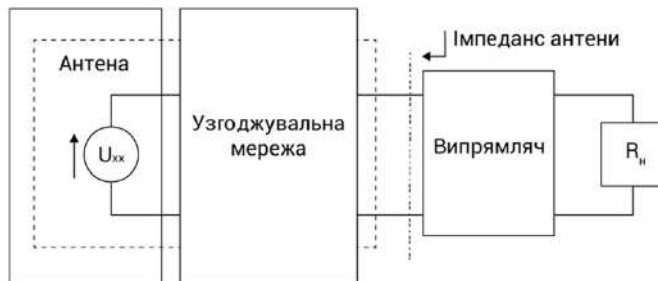


Рис. 1. Система збору радіочастотного сигналу

Функції елементів

Антенa	приймає ЕМ-випромінювання
Узгоджувальна мережа	приймає ЕМ-випромінювання
Випрямляч	перетворює сигнал у постійну напругу
Накопичувач	зберігає енергію для навантаження

Вимоги до антени

- Всеспрямованість
- Компактність
- Широкосмуговість / багатодіапазонність
- Високий ККД
- Добра узгодженість із випрямлячем

Підсилення антени

6



Рис. 1. Система збору радіочастотного сигналу

Ефективність системи

$$\eta = \eta_{RF} \cdot \eta_{DC} \quad (1)$$

$$\eta_{RF} = \frac{P_{RF}}{P_{ex}} \quad \text{коефіцієнт ефективності прийому антени}$$

$$\eta_{DC} = \frac{P_{DC}}{P_{RF}} \quad \text{ефективність випрямлення}$$

$$P_{RF} \quad \text{радіочастотна потужність на вході випрямляча}$$

$$P_{DC} \quad \text{випрямлена потужність на виході випрямляча}$$

Вхідна потужність

$$P_{ex} = \frac{\lambda^2}{4\pi} K \cdot P_i \quad (2)$$

- ключовий параметр — **підсилення антени K**
- чим більше **K**, тим більше енергії потрапляє у випрямляч
- зростання **K** напряму підвищує загальну ефективність системи збору енергії

збільшення коефіцієнта підсилення **K** дозволяє істотно **підвищити рівень зібраної потужності**

Потреба у нових енергоавтономних рішеннях

7

Формування променя

- Забезпечує спрямування ЕМ-енергії в потрібному напрямку
- Використання антенних решіток → вузький промінь і високий коефіцієнт підсилення
- Необхідне на високих частотах (мм-хвилі)

Трирівнева збиральна поверхня

1 рівень

базовий квадратний випромінювач / піксельна комірка

2 рівень

підматриця 3×3

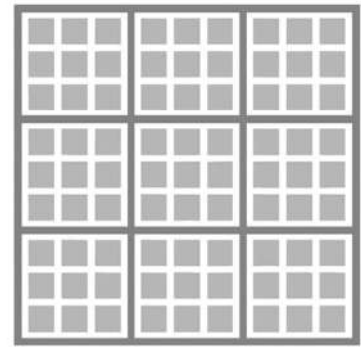
3 рівень

дев'ять підматриць (3×3 підматриць)
→ масштабована надструктура

Забезпечує багатонапрямний збір енергії та розширене кутове охоплення



Рис. 2. Ієрархічна структура поверхні збирання енергії



Вертикальна структура та енергетична взаємодія підматриць

8



Рис. 3. Вертикальна структура підматриць з блоком формування напрямленості та фазовим керуванням

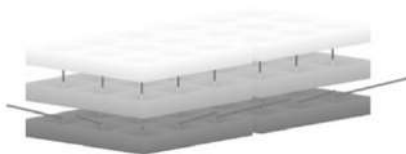


Рис. 4. Взаємозв'язок двох підматриць 3×3 через комбінатори потужності

Підматриці не лише **приймають енергію**, а й **взаємно підсилюють одна одну**, передаючи частину потужності до сусідніх модулів

На виході

- Об'єднана потужність подається на випрямлячі.
- Постійні струми формують єдину узгоджену енергомережу з мінімальними втратами.

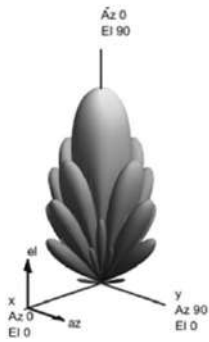
Переваги

- підвищена ефективність збору енергії;
- масштабованість;
- адаптивність до різних умов середовища.

Діаграми спрямованості та кутове покриття

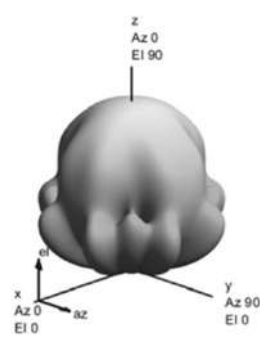
9

Підрешітка 2-го рівня



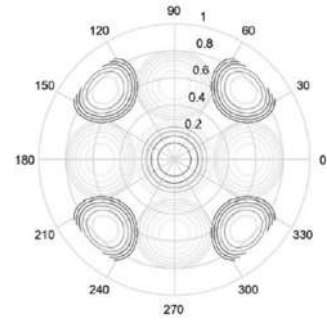
вузька ДС, ефективна при відомому напрямку джерела

Підрешітка 3-го рівня



значно ширше кутове покриття, придатне для невідомих або змінних джерел

Рис. 6. Кутове покриття об'єднаних променів у межах системи збору енергії

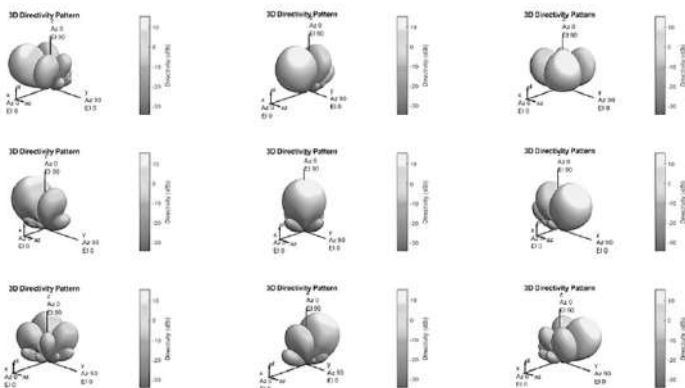


- Рівномірне кутове покриття завдяки об'єднанню променів
- Стабільна потужність у широкому секторі

Рис. 5. Діаграми спрямованості підрешіток

Формування широкої діаграми спрямованості третього рівня

10



- Дев'ять входів подаються на 9 портів об'єднувача потужності
- Кожен вхід має власний напрямок випромінювання
- Сукупність променів формує упорядкований набір кутових орієнтацій

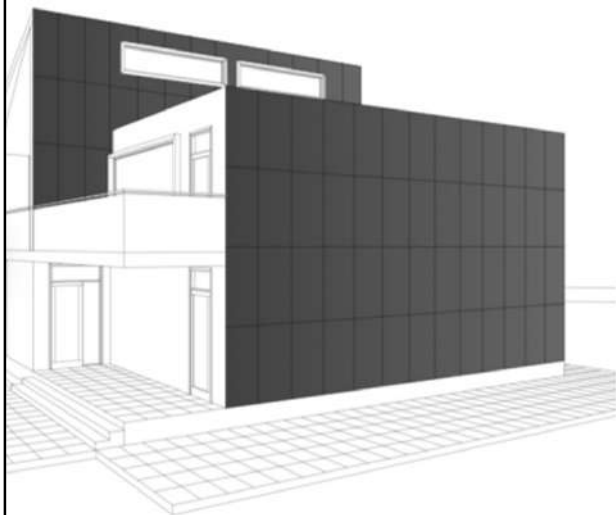
Результат – комбінована діаграма з

- високим коефіцієнтом підсилення
- широким кутовим охопленням

Рис. 7. Еквівалентні діаграми спрямованості дев'яти входів об'єднувача потужності

Фасад як джерело бездротової енергії

11



Енергетичний фасад

Непомітні та адаптивні модулі

Збір енергії з повітря

Розумна енергоекономія будівель

Крок до нової відновлюваної енергетики

Висновки

12



Перспективи:
оптимізація геометрії,
адаптивне керування,
розширення діапазону та
створення повного
прототипу

1. Запропоновано концепцію великомасштабного бездротового енергетичного колектора на основі дворівневої метаповерхні
2. Модульна структура та багаторівневе просторове сумування **забезпечують високу ефективність збору енергії**
3. Досягнуто **широке кутове охоплення та значне підсилення**, підтверджене моделюванням і напівнатурними випробуваннями
4. Архітектура формує «енергетичний резонатор», що підвищує загальний ККД системи

Довідка: ВХНУ ТН 27/11/25

Видання: Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки

Категорія фаховості видання: фахове видання України, у якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії, категорії «Б» філософії, категорії «Б» (наказ МОН №1643 від 28.12.2019, наказ МОН №409 від 17.03.2020).

Напрямок – технічні науки за спеціальностями – 101, 121, 122, 123, 124, 125, 141, 151, 161, 172, 181, 182 (28.12.2019), спеціальності – 131, 132, 133 (17.03.2020)

Назва статті:

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА БАГАТОРІВНЕВА СИСТЕМА ЗБОРУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Автори:

БОЙКО Ю.М. (Хмельницький національний університет)

КАРПОВА Л.В. (Хмельницький національний університет)

ГОНЧАР А.Д. (Хмельницький національний університет)

Номер, у який попередньо прийнято статтю: №1 до друку орієнтовно буде рекомендовано до 01 лютого 2026 року.

27.11.2025

Начальник відділу
інтелектуальної власності та трансферу технологій,
відповідальний секретар Вісника ХНУ



Ю. В. Кравчик

БОЙКО ЮЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

e-mail: boiko_julius@ukr.net

КАРПОВА ЛЕСЯ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5015-2107>

e-mail: rtlesya@gmail.com

ГОНЧАР АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

e-mail: honchar244@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА БАГАТОРІВНЕВА СИСТЕМА ЗБОРУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОЇ ЕНЕРГІЇ

У роботі представлено концепцію великомасштабного бездротового збирача електромагнітної енергії на основі інтелектуальної багаторівневої збиральної поверхні. Архітектура поєднує горизонтальне кутове охоплення та вертикальне акумулювання потужності через ієрархічно організовані приймальні елементи. Така структура забезпечує підвищену ефективність збору енергії та покращений коефіцієнт підсилення. Результати моделювання підтверджують перспективність концепції для систем бездротового живлення та відновлюваної енергетики.

Ключові слова: бездротове збирання енергії; електромагнітне енергозбирання; багаторівнева інтелектуальна поверхня; архітектура приймальної метаповерхні; мережа формування променя; радіочастотна енергія.

BOIKO JULIY, KARPOVA LESIA, HONCHAR ANDRIY

Khmelnytsky National University

INTELLIGENT MULTI-LEVEL COLLECTION SYSTEM FOR WIRELESS ENERGY

This paper presents a conceptual model of a large-scale wireless microwave energy harvester designed using an Intelligent Reconfigurable Collecting Surface architecture. The proposed concept contributes to the advancement of renewable and wireless energy technologies by introducing a novel hierarchical structure that enables efficient microwave energy capture and concentration over extended spatial regions. The system is composed of a large number of elementary harvesting units, each capable of receiving and partially processing the incident microwave energy. These units are organized into a two-level hierarchical configuration distributed across both horizontal and vertical planes to maximize the overall collection performance.

In the horizontal plane, the receiving surface is implemented as an array of square radiating elements arranged into subarrays that provide wide angular coverage and adaptability to different directions of incoming waves. Each subarray operates cooperatively to ensure uniform energy reception even under varying incidence angles and environmental conditions. In the vertical plane, a hierarchical beamforming and combining network is employed to aggregate the received power based on the watershed principle, where a single receiving port collects energy from its assigned and neighboring elements, similar to how a catchment basin gathers water from its tributaries. This configuration enhances the effective aperture and ensures constructive energy combining with minimal phase losses.

The integrated multi-level structure leads to improved antenna gain, higher power collection density, and better overall system efficiency compared with conventional planar harvesting designs. The simulation and preliminary experimental results demonstrate the feasibility, scalability, and superior energy conversion capability of the proposed

architecture. These findings indicate that the IRCS-based approach is a promising platform for next-generation wireless power transfer systems, energy-autonomous networks, and large-area renewable energy harvesting infrastructures.

Keywords: wireless energy harvesting; electromagnetic energy collection; multilayer intelligent surface; receiving metasurface architecture; beamforming network; radio-frequency energy

Стаття надійшла до редакції / Received 00.00.2020

Прийнята до друку / Accepted 00.00.2020

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний розвиток електроніки, бездротових систем зв'язку та Інтернету речей (IoT) зумовлює постійне зростання потреби у стабільних і довготривалих джерелах живлення для великої кількості малопотужних пристроїв. Традиційні батарейні системи мають обмежений термін служби, потребують періодичної заміни або підзарядки, що ускладнює їх застосування у віддалених, мобільних або мікромасштабних пристроях. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є збирання енергії з навколишнього середовища – процес перетворення енергії, наявної у навколишньому середовищі, у корисну електричну енергію для живлення електронних систем.

Серед можливих джерел – сонячна, вітрова, теплова, геотермальна, радіочастотна та електромагнітна енергія. Особливий науковий інтерес становить збирання електромагнітної (радіочастотної та мікрохвильової) енергії, оскільки вона доступна практично скрізь завдяки наявності численних випромінювачів, таких як базові станції стільникового зв'язку (4G/5G/6G), точки доступу Wi-Fi, передавачі FM-радіо, системи GPS, телевізійні передавачі тощо. Збирання цієї енергії реалізується за допомогою приймально-випрямляючих модулів, які перетворюють високочастотну електромагнітну хвилю на постійний електричний струм.

Попри значні досягнення у сфері приймально-випрямляючих модулів і багатосмугових антенних структур, існує низка технічних обмежень, що стримують ефективне використання таких систем:

- вузьке кутове охоплення приймання сигналу через обмежену спрямованість антен;
- втрати потужності під час поєднання сигналів від множини елементів;
- складність оптимізації фазових і амплітудних характеристик при багатоканальному прийомі;
- зниження ефективності перетворення енергії при зміні напрямку або інтенсивності вхідного випромінювання.

Таким чином, актуальним завданням є розроблення архітектури багаторівневої бездротової системи енергії електромагнітних хвиль, здатної забезпечити широке просторове охоплення, високу спрямованість і підвищену ефективність прийому. З цією метою у даній роботі пропонується використання інтелектуальної багаторівневої збиральної поверхні (IRCS), яка поєднує принципи ієрархічної побудови та формування променя за типом водозбірного басейну. Такий підхід дозволяє акумулювати енергію з кількох напрямків одночасно, підвищуючи щільність зібраної потужності й загальну енергоефективність системи.

Розв'язання цієї проблеми має значну наукову та практичну цінність, оскільки забезпечує фундамент для створення енергоавтономних бездротових сенсорних мереж, розумних пристроїв, безпілотних апаратів та інтелектуальних енергомереж. Таким чином, запропонований підхід сприяє розвитку концепції «зелених» технологій та сталих систем живлення майбутнього.

Аналіз досліджень та публікацій

Проблема бездротового збору енергії активно досліджується у зв'язку з розвитком технологій IoT, систем автономного живлення сенсорів та бездротових телекомунікаційних мереж нового покоління [1]. Основна ідея полягає у перетворенні навколишньої радіочастотної або електромагнітної енергії на електричну, придатну для живлення електронних пристроїв.

Ряд українських досліджень присвячено аналізу ефективності перетворення електромагнітної енергії в енергію постійного струму за допомогою приймально-випрямляючих модулів, які поєднують антену та випрямляч у єдиній системі [2], [3]. Такі системи мають високу перспективність для живлення автономних пристроїв, однак їх ефективність суттєво залежить від умов прийому сигналу, частотного діапазону та орієнтації елементів антени.

Останніми роками значна увага приділяється розвитку інтелектуальних багаторівневих поверхонь, які дозволяють керувати відбиттям, фокусуванням або поглинанням енергії шляхом динамічного регулювання фазових характеристик елементів [4], [5]. Це дає можливість підвищити ефективність збору енергії та збільшити площу охоплення.

У працях вітчизняних науковців, зокрема Хмельницького національного університету, досліджено вплив геометричних параметрів антенних елементів на ефективність поглинання електромагнітної енергії в діапазонах WiMAX та 5G [1]. Окремі роботи присвячено створенню фрактальних або широкосмугових приймально-випрямляючих модульних структур, здатних одночасно працювати в кількох частотних діапазонах [7].

Проблема підвищення ефективності бездротового збору енергії розглядається також у контексті застосування ієрархічних та багаторівневих антенних решіток [8]. Такі системи використовують ефект просторового сумування енергії, коли декілька елементарних антен працюють узгоджено, передаючи потужність до спільного вихідного порту, що нагадує принцип «водозбірного басейну».

Отже, аналіз літературних джерел показує, що ефективність бездротових систем збору енергії залежить від поєднання кількох факторів: архітектури антен, типу приймальної поверхні, використання інтелектуального керування фазами сигналів та методів формування променя. Тому розробка інтелектуальної багаторівневої поверхні для збору енергії, що поєднує властивості метаповерхонь та багаторівневого формування променя, є актуальним і перспективним напрямом сучасних досліджень.

Формулювання цілей статті

Метою статті є дослідження архітектури інтелектуальної багаторівневої поверхні для бездротового збору електромагнітної енергії, яка поєднує принципи ієрархічної побудови та просторового формування променя з метою забезпечення широкого кутового охоплення, підвищеної спрямованості та збільшеної енергоефективності прийому в умовах змінних напрямків і рівнів опромінення.

Виклад основного матеріалу

Типова система збору радіочастотного сигналу зображена на рисунку 1.



Рис. 1. Приклад системи збору радіочастотного сигналу

Основними складовими такої системи є антена-приймач, узгоджувальна мережа, випрямляч, фільтр та накопичувач енергії. Антена приймає навколишнє радіочастотне випромінювання, узгоджувальна мережа забезпечує мінімальні відбиття сигналу, а випрямляч перетворює змінну електромагнітну енергію у постійну напругу, придатну для живлення навантаження.

Ключові характеристики ідеальної антени включають всеспрямовану діаграму спрямованості, що є особливо важливою за відсутності спеціального передавача, компактні габарити, добру узгодженість із випрямлячем, широкосмуговість або багатодіапазонність, а також високий коефіцієнт корисної дії.

Подібні характеристики демонструють сучасні антени, представлені у працях [4].

Система збору енергії може бути описана узагальненим виразом для коефіцієнта корисної дії:

$$\eta = \eta_{RF} \cdot \eta_{DC} \quad (1)$$

де $\eta_{RF} = \frac{P_{RF}}{P_{ex}}$ – коефіцієнт ефективності прийому антени, $\eta_{DC} = \frac{P_{DC}}{P_{RF}}$ – ефективність випрямлення, P_{ex} –

вхідна потужність, P_{RF} – радіочастотна потужність на вході випрямляча, P_{DC} – випрямлена (постійна) потужність на виході випрямляча.

Для підвищення ефективності системи необхідно максимізувати P_{ex} , що безпосередньо залежить від коефіцієнта підсилення антени G :

$$P_{ex} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \cdot P_i \quad (2)$$

де P_i – щільність потужності падаючого випромінювання, λ – довжина хвилі. Із рівняння (2) випливає, що збільшення коефіцієнта підсилення G дозволяє істотно підвищити рівень зібраної потужності.

Формування променя є одним із ключових підходів для ефективного спрямування електромагнітної енергії до заданої цілі. Використання антенних решіток у поєднанні з технологією формування променя забезпечує створення вузьких діаграм спрямованості з високим коефіцієнтом підсилення та контрольованою шириною променя, що дозволяє не лише сфокусовано передавати потужність, але й ефективно працювати в багатокористувацьких середовищах. На високих частотах, зокрема в міліметровому діапазоні хвиль, застосування електронно керованих антен стає необхідним для компенсації зростаючих втрат під час поширення сигналу.

Основними інженерними викликами при проектуванні антенних решіток для бездротової передачі енергії зі сканування променя є взаємний зв'язок між елементами решітки, забезпечення можливості керованого сканування в діапазоні до $\pm 45^\circ$, а також підтримка високої загальної ефективності системи. Одним із поширених технічних рішень є використання лінзи Ротмана, яка забезпечує ширококутне охоплення завдяки своїм ефективним властивостям формування променя та порівняно низькій вартості реалізації.

У системах бездротової передачі енергії формування променя є особливо корисним для сценаріїв із мобільними приймачами, оскільки дозволяє базовій станції динамічно змінювати напрямок переданої потужності, забезпечуючи стабільне енергопостачання приймача в різних просторових положеннях. Для підвищення ефективності енергозбору та подолання обмежень спрямованості було запропоновано низку інноваційних конструкцій антен, серед яких сітчасті антени з багатьма зонами випромінювання, багатопортові поверхневі антени з вбудованими випрямлячами, а також антенні матриці з формуванням променя для багатонапрямого збору енергії. Ці рішення забезпечують підвищення коефіцієнта підсилення та ефективності прийому енергії в різних просторових напрямках, що є критичним для сучасних систем бездротової передачі енергії.

У цьому дослідженні основну увагу приділено конструктивній побудові та принципам організації збиральної поверхні модуля, яка є ключовою складовою запропонованої архітектури інтелектуальної багаторівневої енергозбиральної поверхні. Для моделювання структури використано декартове мозаїчне розбиття, що забезпечує модульність, регулярність та можливість масштабування приймальної площини.

На першому рівні ієрархічної організації кожна базова комірка реалізується у вигляді квадратного випромінювача, налаштованого поблизу власної резонансної частоти або сформованого з кількох піксельних піделементів, що дає змогу підвищити ефективність перетворення та поглинання електромагнітної енергії.

На другому рівні базові випромінювачі об'єднуються в підматриці розміром 3×3 . Така конфігурація забезпечує формування узгоджених субмасивів із розширеною просторовою вибірковістю та покращеними характеристиками приймання.

Третій рівень організації передбачає об'єднання дев'яти підматриць другого рівня (також у форматі 3×3), що формує масштабовану ієрархічну антенну надструктуру з розширеним кутовим охопленням і можливістю реалізації багатонапрямого збору енергії. Запропонована трирівнева організація забезпечує узгодженість між структурними елементами та підвищує ефективність просторового енергозбору (рис. 2).

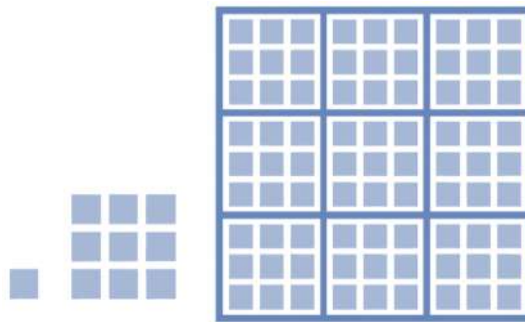


Рис. 2. Ієрархічна структура поверхні збирання енергії: перший, другий та третій рівні горизонтальної організації

Після опису горизонтальної організації системи розглянемо **вертикальну структуру** (рис. 3). У ній елементи підматриці 3×3 підключені до мережі просторового формування променя без втрат із конфігурацією 9×9 , що дозволяє ефективно узгоджувати фази та амплітуди сигналів. Під мережею формування променя розташовано двовимірний комбінатор потужності конфігурації $9:1$. Його центральний вхід з'єднано з центральним виходом мережі формування променя, тоді як бічні входи під'єднуються до сусідніх підматриць. Така схема формує взаємопов'язану енергозбиральну структуру, що ілюструється на рисунку 4.



Рис. 3. Вертикальна структура підматриці з блоком формування напрямленості та фазовим керуванням



Рис. 4. Взаємозв'язок двох підматриць 3×3 через комбінатори потужності

У цій конфігурації кожна підматриця не лише приймає енергію, але й частково передає її до суміжних елементів, забезпечуючи енергетичну інтеграцію між підмасивами. Таким чином, «ліва» підматриця 3×3 живить «правий» комбінатор потужності, тоді як «права» підматриця живить «лівий» комбінатор.

На вихідному етапі сигнали з комбінаторів потужності надходять на відповідні випрямлячі, де електромагнітна енергія перетворюється у постійний струм. Для досягнення максимальної ефективності отримані джерела постійного струму з'єднуються у узгоджену енергетичну мережу, що мінімізує втрати та підвищує коефіцієнт корисної дії всієї системи.

Така багаторівнева та взаємопов'язана архітектура дозволяє досягти підвищеної ефективності збору енергії, а також забезпечує гнучкість у масштабуванні та адаптивності системи до змін умов навколишнього середовища.

На рис. 5 наведено діаграми спрямованості дальньої зони для підрешіток другого (а) та третього (б) рівнів організації. З рисунка видно, що діаграма спрямованості підрешітки третього рівня охоплює значно ширший кутовий простір порівняно з підрешіткою другого рівня. Підрешітки другого рівня доцільно використовувати у випадках, коли відомий напрямок або наявність конкретного передавача. Водночас підрешітки третього рівня є оптимальними для середовищ без чітко визначених або невідомих джерел випромінювання, оскільки забезпечують розширене просторове покриття.

На рис. 6 представлено результати моделювання рівнонаправленого кутового покриття, що додатково підтверджують ефективність об'єднання декількох променів у межах однієї структури. Такий підхід забезпечує

стабільну потужність прийому сигналу в широкому діапазоні просторових напрямків, що є ключовим для ефективного збору енергії з навколишніх джерел.

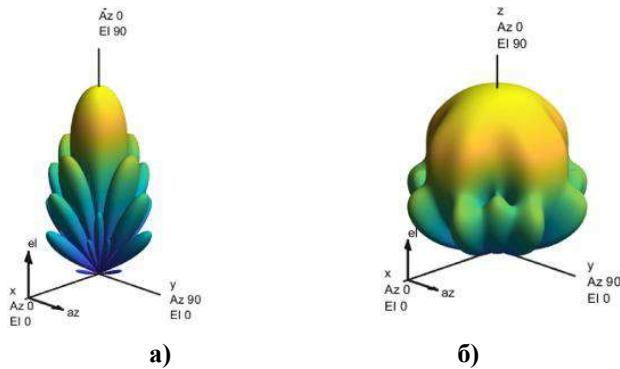


Рис. 5. Діаграми спрямованості підрешіток:
а) – 2-го рівня; б) – 3-го рівня

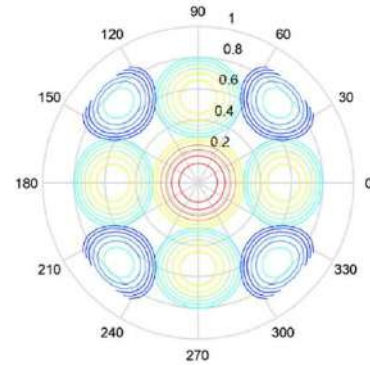


Рис. 6. Кутове покриття об'єднаних променів у межах системи збору енергії

Отримані результати демонструють, що запропонована архітектура належить до нового класу масштабованих рішень на основі антенних решіток, де поєднання тривірневої горизонтальної та вертикальної організації з матрицями формування променя дозволяє досягти високого коефіцієнта підсилення при контрольованій ширині променя. Така конфігурація може бути використана для створення інтелектуальних багаторівневих поверхонь збору енергії або «розумних оболонок», здатних ефективно вловлювати електромагнітну енергію з широкого кутового спектра.

На рис. 7 подано концептуальне зображення можливого практичного застосування – розгортання бездротової системи збору енергії на фасаді будівлі. Таке рішення відкриває перспективи інтеграції технологій енергозбирання в архітектурні конструкції, що сприятиме розвитку відновлюваної енергетики та підвищенню енергоефективності міських інфраструктур.

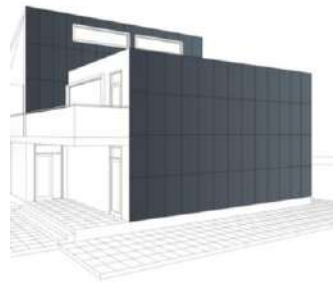


Рис. 7. Концепція розгортання системи збору енергії на стіні будівлі

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У даній роботі запропоновано та проаналізовано концепцію великомасштабного бездротового енергетичного колектора, реалізованого у вигляді електромагнітної метаповерхні з дворівневою організацією. Показано, що модульна структура приймальної площини та використання багаторівневого просторового сумування забезпечують ефективне акумулювання енергії та формування «енергетичного резонатора», який суттєво підвищує коефіцієнт корисної дії системи. Результати чисельного моделювання та напівнатурних випробувань підтвердили працездатність запропонованої архітектури, її широке кутове охоплення та високе підсилення за різних умов опромінення.

Перспективи подальших досліджень передбачають оптимізацію геометричних параметрів модульних елементів для підвищення щільності зібраної енергії, дослідження алгоритмів активного або напівактивного фазового керування для адаптивного формування променя, розширення робочого частотного діапазону та

створення ширококугових збиральних поверхонь, інтеграцію енергозбирача з мікроелектронними перетворювачами й системами стабілізації вихідної потужності, а також виготовлення повномасштабного прототипу та експериментальне вивчення його характеристик у реальних умовах. Запропонований підхід формує основу для розвитку енергоавтономних телекомунікаційних і сенсорних систем та сприяє подальшому вдосконаленню технологій бездротового енергозбирання.

Література

1. Аналіз антенних систем збору енергії для застосувань WiMAX та 5G / Л.В. Карпова, І.Р. Габруський // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Телекомунікації та радіотехніка. – 2024. – № 2. – С. 37–45.
2. Програмно-конфігуровані системи передавання, приймання та обробки інформації : монографія / Ю.М. Бойко, В.П. Ткачук, Л.В. Карпова. – Хмельницький : ХНУ, 2023. – 317 с.
3. Kumar M. An analytical framework of multisector rectenna array design for angular misalignment tolerant RF power transfer systems / M. Kumar, S. Kumar, A. Sharma // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2023. – Vol. 71. – P. 1835–1847.
4. Lin C. Hierarchical energy combining networks for large-scale wireless energy harvesting surfaces / C. Lin, Y. Zhang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2024. – Vol. 72, № 4. – P. 4521–4534.
5. Фрактальні антени для бездротового енергозбирання / С.О. Тарасюк, В.В. Погорілий // Технічна електродинаміка. – 2021. – № 4. – С. 112–118.
6. Мікрохвильові ректенни для бездротового збору енергії / М.С. Хома, Л.О. Сорока // Електроніка та зв'язок. – 2019. – № 4(98). – С. 25–30.
7. Інтелектуальні реконфігуровані поверхні у бездротових мережах: стан та перспективи / О.Г. Петренко, Т.В. Кузьменко // Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Радіотехніка. – 2022. – № 1. – С. 91–98.
8. Ефективність ректенних систем для живлення сенсорних пристроїв / О.С. Попович, В.П. Шевчук // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2021. – № 3(65). – С. 82–88.

References

1. Analiz antenykh system zboru enerhii dlia zastosuvan WiMAX ta 5G / L.V. Karpova, I.R. Habruskyi // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2024. – № 2. – S. 37–45.
2. Prohramno-konfihurovani systemy peredavannia, pryimannia ta obrobky informatsii : monohrafiia / Yu.M. Boiko, V.P. Tkachuk, L.V. Karpova. – Khmelnytskyi : KhNU, 2023. – 317 s.
3. Kumar M. An analytical framework of multisector rectenna array design for angular misalignment tolerant RF power transfer systems / M. Kumar, S. Kumar, A. Sharma // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2023. – Vol. 71. – P. 1835–1847.
4. Lin C. Hierarchical energy combining networks for large-scale wireless energy harvesting surfaces / C. Lin, Y. Zhang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2024. – Vol. 72, № 4. – P. 4521–4534.
5. Fraktalni anteny dlia bezdrotovoho enerhozbyrannia / S.O. Tarasiuk, V.V. Pohorilyi // Tekhnichna elektrodynamika. – 2021. – № 4. – S. 112–118.
6. Mikrohvylovi rektenny dlia bezdrotovoho zboru enerhii / M.S. Khoma, L.O. Soroka // Elektronika ta zviazok. – 2019. – № 4(98). – S. 25–30.
7. Intelektualni rekonfihurovani poverkhni u bezdrotovykh mrezhakh: stan ta perspektyvy / O.H. Petrenko, T.V. Kuzmenko // Visnyk Kyivskoho politekhnichnogo instytutu. Serii Radiotekhnika. – 2022. – № 1. – S. 91–98.
8. Efektyvnist rektennykh system dlia zhyvlennia sensorykh prystroiv / O.S. Popovych, V.P. Shevchuk // Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. – 2021. – № 3(65). – S. 82–88.

ВІДГУК

на кваліфікаційну роботу

здобувача групи ЕКРм-24-1 Андрія ГОНЧАРА

«ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ЗБОРУ БЕЗДРОТОВОЇ ЕНЕРГІЇ»

Кваліфікаційна робота виконана на високому рівні і має значну актуальність, оскільки присвячена розробленню інтелектуальної багаторівневої збиральної поверхні для бездротового збору електромагнітної енергії – напряду, що активно розвивається в сучасних телекомунікаційних та енергетичних технологіях.

Позитивні сторони роботи включають чітке визначення мети, використання сучасних методів моделювання, аналізу електромагнітних полів та підходів метаповерхневої інженерії. Автор обґрунтовано застосував багаторівневу архітектуру, що дозволило підвищити ефективність збирання енергії та забезпечити широке кутове охоплення. Робота відзначається логічною структурою, повнотою досліджень та якісною візуалізацією результатів моделювання.

Негативні сторони роботи пов'язані переважно з відсутністю експериментальної частини та неможливістю виготовлення фізичного прототипу, що зумовлено складністю апаратної реалізації та ресурсними обмеженнями. Також окремі аспекти адаптивного керування потребують подальшої практичної перевірки.

В цілому, кваліфікаційна робота є ґрунтовною і демонструє високу підготовку автора. Вона надає корисні результати, які можуть бути використані для подальшого розвитку систем бездротового енергозбору, оптимізації метаповерхневих структур та створення перспективних енергоєфективних рішень.

Під час виконання кваліфікаційної роботи Андрій ГОНЧАР провів детальний аналіз вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури та патентних матеріалів, що дозволило йому приймати обґрунтовані інженерні рішення. Він проявив креативність, ініціативність, старанність і наполегливість, демонструючи здатність застосовувати набуті знання для розв'язання комплексних технічних задач. Автор показав високий рівень обізнаності у сучасних радіотехнічних, системних та інформаційних технологіях.

Кваліфікаційна робота відзначається високим технічним рівнем та беззаперечною актуальністю для галузі сучасних телекомунікацій. Здобувач Андрій ГОНЧАР заслуговує на оцінку **«добре»**.

Керівник:
к.т.н., доцент



Леся КАРПОВА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Гончар Андрій Дмитрович

Тема роботи: Інтелектуальна система збору бездротової енергії

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційного проекту

Кількість листів креслень Кількість сторінок записки 83

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження У роботі досліджено та розроблено інтелектуальну систему збору радіочастотної енергії на основі багаторівневої метаповерхні. Запропоновано трирівневу структуру з ширококутним формуванням променя та взаємодією підрешіток, що підвищує ефективність збору енергії. У результаті отримано модель масштабованої поверхні, яка працює стабільно для джерел сигналу з різних напрямків.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У першому розділі проаналізовано сучасний стан технологій бездротового енергозбору з урахуванням актуальних наукових публікацій та інноваційних технічних рішень. У другому розділі викладено теоретичні основи побудови інтелектуальної збиральної системи з використанням сучасних моделей і методів аналізу. У третьому розділі розроблено багаторівневу інтелектуальну енергозбиральну систему із застосуванням передових підходів проєктування метаповерхонь та адаптивних алгоритмів. У четвертому розділі проведено моделювання та оцінку ефективності системи за допомогою сучасного програмного забезпечення та актуальних методів чисельного аналізу.

4. Позитивні сторони роботи: Робота вирізняється актуальністю теми та чітко сформульованою науковою метою. У ній запропоновано інноваційну архітектуру багаторівневої інтелектуальної збиральної поверхні, що поєднує сучасні підходи метаповерхневої інженерії та адаптивного енергозбору. Високий рівень теоретичного опрацювання підкріплено коректно побудованими моделями та якісним моделюванням. Отримані результати демонструють практичну цінність і можливість застосування розробленої системи в сучасних бездротових енергетичних технологіях. Робота характеризується структурованістю, науковою обґрунтованістю та відповідністю сучасним тенденціям розвитку радіотехнічних систем.

5. Негативні сторони роботи: До недоліків роботи можна віднести обмежений обсяг експериментальної перевірки запропонованої архітектури та відсутність фізичного прототипу, що зумовлено складністю і ресурсоемністю реалізації. Деякі аспекти адаптивного керування та взаємодії між рівнями структури потребують подальшого поглибленого дослідження. Крім того, модель містить припущення, які спрощують реальні умови роботи системи й можуть впливати на точність оцінки ефективності в практичних застосуваннях.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

7. Відгук про роботу в цілому: Кваліфікаційна робота виконана на високому науково-технічному рівні, містить обґрунтовані теоретичні положення та продемонстровані практичні результати. Автор послідовно й логічно розкрив тему, показав глибоке розуміння сучасних підходів до бездротового енергозбору та метаповерхневих технологій. Запропоновані рішення є актуальними, перспективними та відповідають сучасним тенденціям розвитку радіотехнічних і енергетичних систем. Робота відзначається структурованістю, грамотним викладом матеріалу та самостійністю виконання. Загалом кваліфікаційна робота заслуговує на позитивну оцінку.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка дипломної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки відмінно (4.5/В), а її автору Гончару Андрію, присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності «Електронні комунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Єрмоменко Олександр Іванович – к.т.н., доцент кафедри фізики та електротехніки

« 9 » грудня 2025р.


підпис

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій
д.т.н., професору ПІДЧЕНКУ Сергію
здобувача вищої освіти
ГОНЧАРА Андрія
ФІТ, гр. ЕКРМ-24-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений. Надаю університету право на передачу мого кваліфікаційної роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї кваліфікаційної роботи «Інтелектуальна система збору бездротової енергії» в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія мого кваліфікаційної роботи збігається (ідентична) з друкованою.

28 листопада 2025 р.
дата


підпис

Anti-Plagiarism (UA) v-16.678**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%**

Словники перевірки: UA, US, RU. Помилки в документах: 11%

ID: 251851 Назва: Інтелектуальна система збору бездротової енергії Додано в БД: 2025-12-05 Автора: Гончар Андрій Дмитрович Керівники: Карцова Лєся Вікторівна Консультації: Одонецьки:	Документ		Сумарний збіг по базі даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	110836	1706	2170 (2%)	37 (2%)

Джерело плагиату

ID	Опис	Наявність плагиату в документі	
		Символи	Лексеми

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагиату щодо роботи:

Автор: Андрій ГОНЧАР_ЕКРМ-24-1

Співавтор:

Назва: Інтелектуальна система збору бездротової енергії

Науковий керівник: Леся КАРПОВА, к.т.н., доц

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1:2.5%

Коефіцієнт подібності 2:1%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 22

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-12-05 17:59:49.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагиатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагиатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагиат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагиату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Після аналізу повного звіту подібності виявлено, що виявлені випадки збігів мають тематичний характер, що є результатом термінів і стандартних формулювань.

Дата 05.12.2025

експерт

Олег Трунов

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи: Інтелектуальна система збору бездротової енергії енергетики

Автор: Гончар Андрій Дмитрович

Освітня програма Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Керівник кваліфікаційного проєкту: к.т.н., доцент Карпова Леся Вікторівна

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	-
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	відповідає
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
2	Інші види порушень академічної доброчесності	-

Підтвердження:

Виявлені запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), коефіцієнти подібності складають 2.5% та 1%, а також мають посилання на приведений список літературних джерел.

«08» грудня 2025 р.

Завідувач кафедри ТМІТ

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційного проєкту


Сергій ПІДЧЕНКО


Сергій ПІДЧЕНКО


Леся КАРПОВА