

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та  
робототехніки

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Дослідження методів збору енергії для розробки пристроїв

з автономним живленням

Назва теми

КВРТР.2019005.01.05 ПЗ

**ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ**

17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва

**СПЕЦІАЛЬНІСТЬ**

172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва

**ОСВІТНЯ ПРОГРАМА**

Телекомунікації та інформаційно-  
комунікаційні технології

Виконав:

студент IV курсу, група TP1-19-1



підпис

Олег ГЕРАСИМЧУК

ім'я, прізвище

Керівник: д-р техн. наук, проф.



підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК

ім'я, прізвище

Нормоконтроль:

канд. техн. наук, доцент



підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

ім'я, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри автоматизації та  
комп'ютерно-інтегрованих  
технологій та робототехніки:  
д-р техн. наук, проф.



підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, прізвище

«14» червня 2023р.

Хмельницький, 2023

Факультет	інформаційних технологій
Кафедра	автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки
Освітній рівень:	бакалавр
Галузь знань:	17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність:	172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма:	Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТР

 Валерій МАРТИНЮК

« 01 » лютого 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

ГЕРАСИМЧУКУ Олегу Миколайовичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

1 Тема роботи: Дослідження методів збору енергії для розробки пристроїв з автономним живленням

Керівник роботи: д.т.н., професор Мартинюк Валерій Володимирович

Затверджено наказом по університету від «01» березня 2023р. № 5

2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 03 червня 2023 року

3 Вихідні дані до роботи: схема технологічного процесу, технічне завдання





4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

- Огляд існуючих методів досліджень зі збору енергії.....
- Збір енергії методом коливань.....
- Випрямляюча антена.....
- Радіочастотна система перетворення потужності збору.....

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):

- технічні креслення.

## 6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	КОРЕЦЬКА Людмила к.т.н., доцент		
Антиплагіат	ФЕДУЛА Микола к.т.н., доцент		

7 Дата видачі завдання 01 лютого 2023 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційну роботу	01.02.2023р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційну роботу	05.02.2023р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.03.2023р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2023р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2023р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2023р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційної роботи	10.05.2023р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційної роботи	15.05.2023р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційної роботи	23.05.2023р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційної роботи	28.05.2023р.	виконано

Здобувач



(підпис, дата)

Олег ГЕРАСИМЧУК

Науковий керівник



(підпис, дата)

Валерій МАРТИНЮК

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Дослідження методів збору енергії для розробки пристроїв з автономним живленням»

Автор роботи: Герасимчук Олег Миколайович.

Керівник роботи: д.т.н., професор Мартинюк Валерій Володимирович.

Пояснювальна записка: 61 сторінок, 16 рисунків, 6 таблиць, 36 джерел.

Графічна частина: технічні креслення.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** БЕЗПРОВОДОВА СЕНСОРНА МЕРЕЖ; WBAN; СЕНСОРНИЙ ВУЗОЛ; ПОТУЖНОСТІ; ЕФЕКТИВНІСТЬ; ЗБІР ЕНЕРГІЇ; РАДІОЧАСТОТА; РЕКТЕНА; АНТЕНА; МОНОПОЛЬНА АНТЕНА ВИПРЯМЛЯЧА

Об'єктом дослідження є джерела енергії з найвищою ефективністю, які є похідними від існуючих джерел енергії.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в перетворенні енергії з однієї форми в іншу, для живлення електронних пристроїв.

У даній кваліфікаційній роботі представлено дослідження нових джерел енергії з найвищою ефективністю, які є похідними від існуючих джерел енергії, є важливою областю досліджень і викликає великий інтерес. Збір радіочастотної енергії є багатообіцяючою альтернативою для отримання енергії для бездротових пристроїв безпосередньо з джерел радіочастотної енергії в навколишньому середовищі. Сучасний погляд на схеми для збирання енергії базується на принципах кондиціонування живлення, які також включають перетворення змінного струму в постійний і регулювання напруги. У сфері перетворення енергії схеми збору енергії часто накладають електричні межі для пристроїв, які важливі для максимізації енергії, що збирається. Ефективність перетворення потужності у кваліфікаційній роботі описується як співвідношення між вихідною потужністю постійного струму випрямляча та вхідною потужністю радіочастоти антени (перед її проходженням через відповідну мережу).

03.06.2023 р.



## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	4
ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗІ ЗБОРУ ЕНЕРГІЇ .....	9
1.1 Методи збору енергії.....	11
1.2 Класифікація методів збору енергії.....	14
1.3 Збір фотоелектричної енергії .....	15
1.4 Термоелектричний збір енергії .....	17
1.5 Збір енергії методом коливань .....	22
1.6 Висновки до першого розділу .....	23
2 ПЕРЕТВОРЕННЯ КОЛИВАНЬ .....	24
2.1 Електромагнітне перетворення коливань .....	24
2.2 Електростатичне перетворення вібрації.....	26
2.3 П'єзоелектричне перетворення коливань .....	27
2.5 Радіочастотний збір енергії .....	29
2.6 Гібридний збір енергії.....	31
2.7 Висновки до другого розділу .....	33
3 ВИПРЯМЛЯЮЧА АНТЕНА.....	34
3.1 Антена.....	37
3.2 Типи антен.....	41

КвРТР.2019005.01.05 ПЗ								
ин.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження методів збору енергії для розробки пристроїв з автономним живленням  Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
озроб.		Герасимчук О.М.		14.06.23				
перевір.		Мартинюк В.В.		14.06.23			2	64
оцenz.						ХНУ, гр. ТР1-19-1		
Контр. атверд.		Корецька Л.О.		14.06.23				
		Мартинюк В.В.		14.06.23				

3.2.1	Дипольна антена.....	42
3.2.2	Мікросмугова патч-антена .....	42
3.2.3	Рупорна антена .....	44
3.2.4	Рамкова антена .....	46
3.2.5	Спіральна антена.....	47
3.3	Висновки до третього розділу.....	49
4	РАДІОЧАСТОТНА СИСТЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ЗБОРУ .	50
4.1	Мережа узгодження імпедансу.....	51
4.2	Випрямляюча схема .....	53
4.3	Технології накопичення енергії.....	56
4.4	Висновки до четвертого розділу.....	57
	ВИСНОВКИ.....	58
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	59

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АС	–	змінний струм
АМРС	–	Advanced Mobile Phone Systems – передові системи мобільних телефонів
DC	–	постійний струм
GSM	–	Global System for Mobile
OTFSC	–	органічні тонкоплівкові сонячні елементи
UMTS	–	універсальна мобільна телекомунікаційна система
WiMAX	–	мікрохвильовий доступу
ВЧ	–	висока частота
ЕБСМ	–	екологічна бездротова сенсорна мережа
ЕПП	–	ефективність перетворення потужності
ЕРС	–	електрорушійна сила Е
КСХ	–	коефіцієнта стоячої хвилі
МЕМС	–	мікроелектромеханічна система
НВЧ	–	надвисока частота
ПЗП	–	п'єзоелектричні перетворювачі
РЧ	–	радіочастота
ТЕГ	–	термоелектричний генератор

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Для бездротової передачі енергії немає обмежень. Бездротова передача енергії вимагає бездротової передачі енергії через передавач, що підключений до джерела живлення; енергія перетворюється назад в електричний струм, а потім використовується для передачі енергії назад до одного або кількох приймачів. Використання доступних екологічних комунікаційних стратегій набуло вирішального значення через появу та зростання популярності Інтернету речей (IoT) і впровадження широкомасштабних бездротових мереж із датчиками. Більшість цих пристроїв повинні працювати без акумуляторів, і з цієї причини потрібна схема збору енергії, щоб вони могли отримувати бездротову енергію [1,2].

Три підсистеми можна згрупувати в систему збору енергії. Перша підсистема збирає енергію за допомогою котушок, які забезпечують індуктивний зв'язок, або антен, що забезпечує передачу енергії на великі відстані. Після того, як енергію буде зібрано, її зібраний тип буде непридатним для використання, тому для перетворення енергії потрібна друга підсистема. Друга підсистема змінює отриману енергію, щоб зробити її придатною для використання. Тут використовується випрямляч для перетворення отриманого сигналу змінного струму в постійний, оскільки більшість пристроїв потребують джерела живлення постійного струму. Необхідно забезпечити належне зберігання випрямленої енергії, щоб її можна було використовувати в майбутньому. Третя підсистема відповідає за зберігання енергії, отриманої за допомогою бездротового збирача енергії, і ця підсистема має велике значення через доступність низького споживання енергії [1,3,4].

Ефективність зібраної енергії може бути покращена та максимізована шляхом оптимізації трьох підсистем. Що стосується передачі енергії до пристрою потужність може бути ефективно передана, якщо вибрати відповідну схему. Правильна схема залежить від діапазону від передавача (Tx) до приймача

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(Rx). Магнітно-індукований зв'язок передає потужність до реактивної області закритого поля. При більшій відстані передача потужності в дальню зону здійснюється за допомогою антен [1,5]. Використання антенної решітки може бути використане для підвищення ефективності системи в кожній з робочих областей; це тому, що антенна решітка має здатність сканувати та фокусувати промені. Для подальшого вдосконалення накопичувача енергії та випрямляча, які є іншими підсистемами, необхідно використовувати відповідний випрямляючий елемент і топологію разом із відповідним пристроєм накопичення енергії для застосування [3]. Основною причиною використання технологій збору енергії є можливість створення бездротової сенсорної платформи, яка є повністю незалежною та самодостатньою. Ці технології також можна використовувати для створення енергоефективних пристроїв для розумних міст, розумних будинків і додатків Інтернету речей, які можуть суттєво вплинути на наше майбутнє життя. Тим не менш, оптимальна конструкція випрямної антени або прямої антени (ректини) залишається проблемою [6].

Розумність фабрик, офісів і будинків зростає завдяки появі пристроїв Інтернету речей, а також бездротових датчиків, які потребують живлення від електрики. Незважаючи на те, що в цих пристроях часто використовується акумулятори, все одно існує потреба в електроенергії, оскільки акумулятори потребують обслуговування та мають обмежений термін служби [6]. Щоб подовжити термін служби акумуляторів, дослідники розробили рішення для бездротової зарядки; деякі з рішень для заряджання включають збір радіочастотної енергії, збір сонячної енергії та індукційний заряд. При зборі потужності радіочастотна енергія приймається з навколишніх радіочастотних джерел, таких як точки доступу Wi-Fi і базові станції стільникового зв'язку, а потім зібрана радіочастотна енергія перетворюється на постійний струм. Пристрій випрямлення, що складається з двох основних компонентів (антени та схеми перетворення (RF-to-DC)), виконує цю процедуру [6]. Джерела навколишньої радіочастотної енергії включають FM, Wi-Fi, глобальну систему

						КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
							6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

мобільного зв'язку (Global System for Mobile – GSM), цифрове телебачення, AM, Bluetooth, WLAN тощо. Існують різні пристрої, які живляться від навколишньої радіочастотної енергії, включаючи бездротові телемережі, радіочастотні ідентифікаційні мітки, бездротові сенсорні вузли тощо [7].

Антенa розташована на передньому кінці радіочастотного пристрою, і ця антенa приймає та передає радіочастотні сигнали до інших елементів схеми. Кількість зібраної енергії залежить від параметрів випромінювання антени, таких як ширина променя, ефективність, підсилення, поляризація, смуга пропускання тощо. В основному антенa для збору радіочастотної енергії (RF-EH) має бути портативною, компактною, інтегрованою тощо, щоб забезпечити легке вбудовування. Крім того, антенa повинна мати високий коефіцієнт підсилення, щоб забезпечити прийом доступної енергії, і вона також повинна мати високу ефективність, щоб втрати могли бути мінімізовані [8]. Кілька досліджень повідомляють про збір радіочастотної потужності з однієї смуги частот [8,9,10]. Якщо діапазон корисної потужності є низьким, надається мінімальна вихідна потужність. Фактично важливо отримувати енергію з широкого діапазону частот або кількох діапазонів, що дозволяє більше потужності постійного струму. Тим не менш, через нелінійність випрямляча, архітектура багатосмугових або широкосмугових ректен є досить складною. У [10] U-подібний слот на патчі використовувався для прищеплення широкосмугової антени. Для виготовлення чотирідіапазонної антени використовувалися T-подібний живильний патч і перевернутий T-подібний шлейф. Широкасмугова антенa і двосмугова розроблені в [13]. У [14] представлено широкосмугову антену, створену за допомогою діелектричного фрактального резонатора Мінковського. Крім того, антенa може працювати в багатодіапазонному режимі, вставивши T-подібний слот в заземлену площину. Для широкосмугового збору радіочастотної енергії покращена смуга пропускання антени не є достатньою, оскільки випрямляч працюватиме в тому ж діапазоні частот, що й антенa. Багатодіапазонні та бездротові ректени були представлені різними техніками. У [15]

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

задокументовано використання кількох корекційних пристроїв, що працюють з одно- або дводіапазонним діапазоном.

У даній кваліфікаційній роботі подано огляд процедур розробки енергозбору. Крім того, надається порівняння між методами збору енергії на основі різних джерел енергії та параметрів. Тим не менш, кілька типів антен, які можуть бути використані в комплексних системах збору енергії, розглядаються перед порівнянням з точки зору їх розміру, коефіцієнта підсилення, ефективності тощо.

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						8
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗІ ЗБОРУ ЕНЕРГІЇ

У кваліфікаційній роботі використовується офлайн-характер роботи, де припускається, що передавач точно знає кількість і час надходження енергії заздалегідь. Максимізація автономної пропускної здатності для систем збору енергії нещодавно викликала значний інтерес [15-20].

У [15] розв'язано задачу мінімізації часу завершення передачі в системах збору енергії з акумулятором необмеженої ємності, який працює по статичному каналу. Пізніше рішення цієї проблеми було розширено для батареї обмеженої ємності, каналу з завмиранням, широкоповного каналу, каналу множинного доступу, каналу перешкод і каналу ретрансляції. Максимізація пропускної здатності в автономному режимі для систем збору енергії з витоком в накопичувачі енергії вивчалася в [16]. У роботах [17-19] досліджено межі оптимальної продуктивності багатокористувацьких бездротових систем з передачею енергії в автономному режимі. Нарешті, [20] розглядає максимізацію автономної пропускної здатності для пристроїв збору енергії за наявності втрат накопичення енергії.

Як підкреслюється в [15-20], надходження енергії накладають причинно-наслідкові обмеження на політику енергоменеджменту. Крім того, обмеження батареї накладає обмеження на відсутність переповнення енергії. Оскільки відношення швидкість-потужність є увігнутим, розподіл енергії має бути максимально постійним у часі з урахуванням причинності енергії та обмежень відсутності переповнення енергії. За наявності гібридного накопичувача енергії причинність енергії та обмеження відсутності переповнення енергії набувають нової форми, оскільки передавач має керувати внутрішньою енергетичною динамікою накопичувача на додаток до рівнів потужності, що споживаються з цих пристроїв. В роботі фіксується неефективність батареї за коефіцієнтом  $\eta$  і вирішуємо отриману проблему максимізації пропускної здатності в автономному режимі. Хоча попередні роботи з максимізації пропускної

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здатності в автономному режимі не розглядали цю більш реалістичну модель зберігання енергії, гібридна модель зберігання з'явилася в [21]. У цій роботі автори аналізують протокол збереження й передачі в бездротових системах збору енергії з гібридною моделлю зберігання, яка працює на каналах із завмиранням. Виведено оптимальний коефіцієнт економії, який мінімізує ймовірність відключення, і надано деякі корисні рекомендації. Дана кваліфікаційна робота відрізняється від [21] тим, що нашою метою є максимізація пропускної здатності, і в роботі виконується оптимізація за послідовністю змінних. Крім того, на відміну від гібридної моделі зберігання в нашій роботі, обидва пристрої зберігання даних мають необмежену ємність у моделі [21].

Природним способом формулювання цієї проблеми для вказаної моделі є енергія, що витікає з суперконденсатора і батареї, і частина вхідної енергії, яку потрібно зберегти в суперконденсаторі. Замість цього, в дусі [22], ми формулюємо проблему в термінах енергії, що витікає з суперконденсатора і батареї та енергії, що передається від суперконденсатора до батареї після початкового зберігання всієї вхідної енергії в суперконденсаторі, наскільки це можливо. Така постановка виявляє багато спільного в цій проблемі з попередніми роботами. Ця проблема стосується максимізації сумарної пропускної здатності в каналі множинного доступу з передавачами збору енергії, оскільки енергія, що витрачається з двох черг, сприяє передачі загальних даних. Модель втрати заряду батареї нагадує модель [20], де передавач може зберігати вхідну енергію в акумуляторі з втратами або використовувати її негайно для передачі даних. Нарешті, одностороння передача енергії від суперконденсатора до батареї стосується проблеми, розглянутої в [16], де розглядається двокористувацький канал множинного доступу з передачею енергії від одного вузла до іншого.

У кваліфікаційній роботі поширюється проблема максимізації пропускної здатності в автономному режимі на випадок, коли в схемі передачі даних

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

присутні лінійні витрати на обробку даних. Добре відомо, що споживання електроенергії ланцюгом є незначним у порівнянні з потужністю, витраченою на передачу даних у невеликих масштабах і застосуваннях малої дальності. Зазначається, що значна частина комунікаційних додатків для збору енергії потрапляє в цю категорію, і вплив потужності кола досліджувався в попередніх роботах щодо комунікацій для збору енергії. Розподіляється доступний час для суперконденсатора і батареї та змушуємо суперконденсатора і батарею оплачувати вартість енергії у відповідні проміжки часу.

### 1.1 Методи збору енергії

Збір енергії – це процес, за допомогою якого невелика кількість отриманої енергії збирають або збирається з атмосфери та перетворюється на енергію, яку можна використати миттєво та пізніше. У цьому процесі використання джерела енергії поширюється на місця, в яких відсутнє електропостачання [18]. Зібраної енергії достатньо для більшості бездротових додатків, дистанційного зондування, радіочастотної ідентифікації і імплантатів тіла. Крім того, термін служби акумуляторів можна подовжити за допомогою більшості джерел збору енергії, навіть якщо зібраної енергії мало. Більшість малопотужних пристроїв, таких як медичні прилади, датчики та портативні пристрої, в основному живляться від акумуляторів (батареюк), які необхідно міняти кожні 5–10 років через обмежений термін їх служби [19].

Основною метою збору енергії є можливість перетворення енергії з однієї форми в іншу, щоб її можна було використовувати для живлення електронних пристроїв. Коли реалізація збору енергії здійснюється у вузлах екологічного моніторингу, навколишню енергію можна безпосередньо отримувати з навколишнього середовища під наглядом, а потім видобуту потужність можна використовувати для живлення вузлів екологічної бездротової сенсорної мережі (ЕБСМ). Таким чином, продуктивність вузлів екологічної бездротової сенсорної

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

мережі може бути покращена, продовжуючи термін їх служби. Завдяки можливостям зовнішнього середовища можна використовувати природні елементи, такі як сонячне світло чи вітер, які присутні в навколишньому середовищі. Також до цих природних елементів, вузли можуть живитися за допомогою інших видів енергії, таких як радіочастотні сигнали, що надходять від діяльності людини [20].

Для збору енергії було розглянуто широкий спектр джерел енергії. Одним з основних критеріїв, який необхідно враховувати при виборі джерела збору енергії, є його здатність забезпечити необхідний рівень потужності для сенсорного вузла. Як правило, розсіювання потужності відбувається під час перетворення напруги, а збільшення співвідношення вхідної та вихідної напруги призводить до збільшення розсіювання потужності. Таким чином, дуже важливо переконатися, що напруга та струм виробленої потужності є відповідними. Бажаного рівня потужності можна досягти шляхом збільшення джерела енергії або шляхом відповідного масштабування пристрою збору енергії [21].

Дослідники представили легку двосмугову ректену для живлення та зберігання енергії для бездротової передачі. Вони інтегрували нову антену, яка нагадувала виноградну лозу, що містить дводіпазонну мережу, що поєднує дві окремі радіальні гілки та повну схему випрямлення Грейначара. Завдяки ректені стало можливим захоплювати та перетворювати радіочастотну потужність одночасно з діапазонами 2,45 ГГц Wi-Fi та 3,5 ГГц для всесвітньої сумісності для мікрохвильового доступу (WiMAX). В іншому дослідженні запропоновано схему збору енергії змінного та постійного струму без випрямляча. За допомогою запропонованої схеми збору енергії енергію можна було б збирати з різних п'єзоелектричних перетворювачів низької напруги. Також було запропоновано компактну широкосмугову щілинну антену, щоб підвищити ефективність ректен при зборі радіочастотної потужності з діапазону LTE-2300/2500.

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

В іншому дослідженні було запропоновано багатопортову ректену. Багатопортова ректена була запропонована для збору навколишньої радіочастотної енергії. Новизна дано роботи полягає в тому, що кількість використовуваних портів залежить від частоти, коли використовується однакова загальна площа. Також представлено мініатюрну щілинну планарну антену разом із системою збору енергії. Запропонована система має компактний розмір 18 мм × 30 мм із широкосмуговими характеристиками та забезпечує кращий коефіцієнт посилення для різних частот. У іншій роботі представлено версію датчика самопідтримуваної мережі тіла. Модель складалася з компактної електро-тридіапазонної ректени, мікроконтролю, регулювання постійного струму (DC), сенсорного модуля, а також контактного модуля та модуля зберігання.

У роботі [22] запропоновано новий куб із дводіапазонними антенними решітками для збору радіочастотної енергії. Смуга пропускання запропонованого куба збору коливалась від 1,85 до 1,93 ГГц і від 2 до 2,10 ГГц відповідно, охоплюючи GSM-1800 і Універсальну мобільну телекомунікаційну систему (UMTS-2100) зі смугами стільникової мережі. В [23] запропоновано та розробили систему збору радіочастотної енергії та бездротову систему передачі електроенергії на основі радіочастот для додатків, які є самопідтримуваними та не потребують батареї. Огляд описаних досліджень збору енергії узагальнено та продемонстровано в таблиці 1.1.

Нижче наведено ключові цілі технології збору енергії:

- збільшення терміну служби;
- демонтаж основних проводів живлення;
- усунення або зменшення залежності від акумуляторів;
- технічне обслуговування або/або підвищення ефективності;
- простота монтажу;
- зменшення витрат;
- зменшення відходів.

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Приклади досліджень зі збору енергії

Тип антени	Технологія	Частота (ГГц)	ККД, %	Підсилення (дБі)	Вхідна потужність (дБм)	Навантаження (кОм)	Розмір см × см
Деревоподібна антена	–	2.45/3.5	60	–	0	0.9-20	35 × 37
–	Синхронне виділення електричного заряду	6.5	79	–	–	–	50 × 100
Щілинна антена	–	2–31	70	2.5	5	2–20	35 × 50
Рупорна антена	Симулятор повнохвильового ЕМ випромінювання та симулятор гармонійного балансу	5.0	48	15	0	0.5–1.1	20 × 20
Рупорна антена	Поляризаційне різноманіття	0.94–1.84	42	3–4	–20	7	240×240
Прямокутна антена з прорізами,	Техніка налаштування заглушки	2.45	68	5.6	5	5	13×18
Кільцева кільцева щілина та періодична антенна решітка	Технологія комплементарного металооксидного напівпровідника	0.9 2.025 2.360	59	1 2.64–0.19	–10	2	70 × 66
Мікросмугова антена	Технологія багат шарової підкладки	1.85–1.93 2.0–2.1	53.6	3.8–9.3	0	10	20 × 07
Спиральна антена	Індуктивний зв'язок і резонансний зв'язок	0.424 0.441	66.8 76	2	–3 0	4.7	41 × 5.2

## 1.2 Класифікація методів збору енергії

Споживання енергії спрямоване на продовження терміну служби акумулятора або заміну акумулятора. Тим не менш, створення пристрою, який може ефективно поглинати енергію з потужністю, достатньою для підтримки сенсорної мережі, є складним. Для визначення придатності відповідної енергії для певної програми бездротової телемережі можна використовувати різноманітні фактори. Деякі параметри, які слід враховувати, включають вихідну потужність, фізичний розмір системи, вихідний опір і доступність зовнішнього джерела. Зокрема, вихідна потужність схеми поглинання енергії коливається від мікровоат до міліват, а потужність, необхідна для роботи системи, є порівняно низькою. Крім того, втрати спричиняються складними системами з кількома інтерфейсними схемами, і такі втрати призводять до зниження ефективності схеми. Таким чином, один із поширених підходів, що використовуються для

підвищення ефективності цих схемних інтерфейсів, полягає в їх комбінуванні; шляхом їх комбінування можна зменшити розмір і вартість схеми.

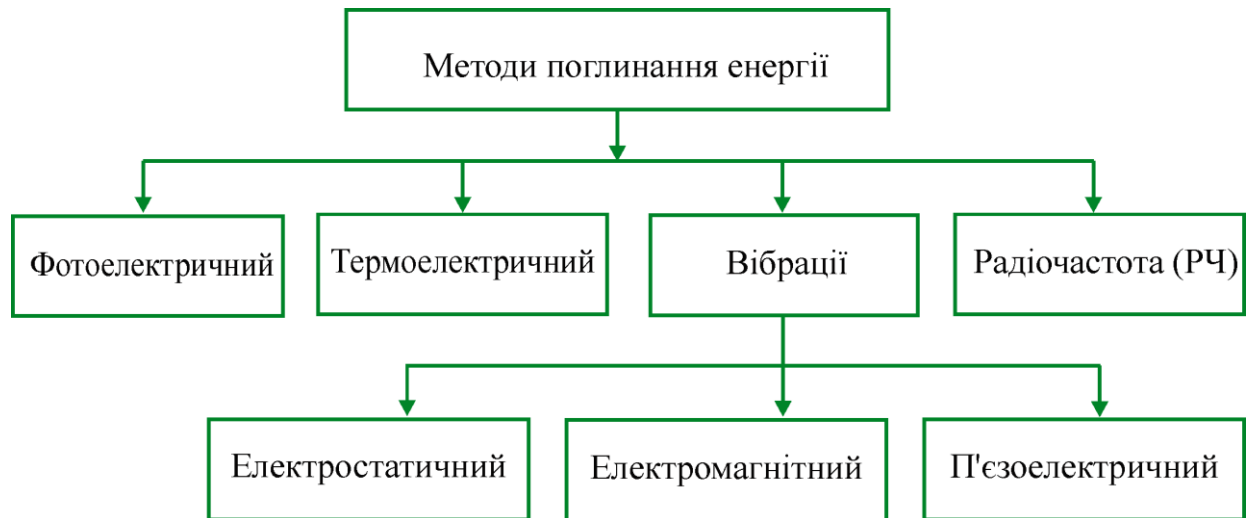


Рисунок 1.1 – Методи поглинання енергії в мікрмасштабі

Тим не менш, інтеграція схемних інтерфейсів створює нову проблему для розробника схем з точки зору обмежень щодо вартості та розміру. Таким чином, для мереж бездротових телемереж та інших потенційних застосувань рівень інтеграції для схеми поглинання енергії є ще одним важливим параметром.

### 1.3 Збір фотоелектричної енергії

При поглинанні фотоелектричної енергії електроенергія виробляється пристроями за допомогою сонячного світла або будь-якого іншого штучного джерела світла. Зазвичай світло від зовнішнього джерела поглинається фотоелектричними елементами, які складаються з напівпровідникових матеріалів. Завдяки ефекту р-п-переходу поглинене світло виділяє електрони з напівпровідника. Збір вивільнених електронів і дірок відбувається на електродах, створюючи різницю напруг.

Однак основним недоліком цієї технології є те, що вона не функціонує без джерела світла, і, таким чином, кількість застосувань обмежена. Використання фотоелектричних технологій було успішно застосовано для комерційного використання як у дрібномасштабному зборі енергії, так і у великомасштабних промислових застосуваннях відновлюваної енергії. У дрібній промисловості він використовується у вигляді зарядних пристроїв для вільного часу та портативних блоків живлення. На відміну від цього, у великій промисловості він використовується у допоміжному виробництві електроенергії та сонячних електростанціях. Останніми роками дослідники зосередилися на розробці органічних тонкоплівкових сонячних елементів (organic thin-film solar cells – OTFSC), які є порівняно дешевими та вимагають менше енергії для виробництва.

Перетворення енергії фотоелектричного елемента описується як відсоток від максимальної потужності  $P_{\max}$ , отриманої від енергії падаючого світла  $P_c$ , це визначається виразом (2.1).

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_c} = \frac{U_{\max} I_{\max}}{P_c} = \frac{K_z I_{K3} U_{XX}}{P_c}, \quad (1.1)$$

де  $K_z$  – коефіцієнт заповнення;

$P_c$  – потужність падаючого світла;

$P_{\max}$  – максимальна потужність;

$I_{K3}$  – струм короткого замикання;

$U_{XX}$  – напруга холостого ходу.

Коефіцієнт заповнення  $K_z$  є розрахунком якості сонячної батареї і базується на струмі короткого замикання  $I_{K3}$  та на напрузі холостого ходу  $U_{XX}$ .

Щоб досягти  $K_z$ ,  $U_{XX}$  і  $I_{K3}$  розділені точкою максимальної потужності.

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фотоелектричні елементи, які спеціально розроблені для збору енергії, можна використовувати як усередині, так і на вулиці. Інтенсивність світла в приміщенні зазвичай нижча, ніж у зовнішньому середовищі.

Інтенсивність електроенергії, яку виробляє сонце, набагато вища, ніж у штучного джерела світла, такого як галогенна лампа, лампа розжарювання або люмінесцентна лампа. Тому для досягнення максимально можливої потужності необхідно враховувати спектральні властивості сонячного світла, оскільки ці спектральні характеристики визначають робочий діапазон кожного виду світла. Ефективність фотоелектричного елемента, яка залежить від матеріалу, з якого виготовлений елемент, є вищою в певному діапазоні довжин хвиль. На рисунку 1.2 показано загальну модель для фотоелектричної системи збору енергії.

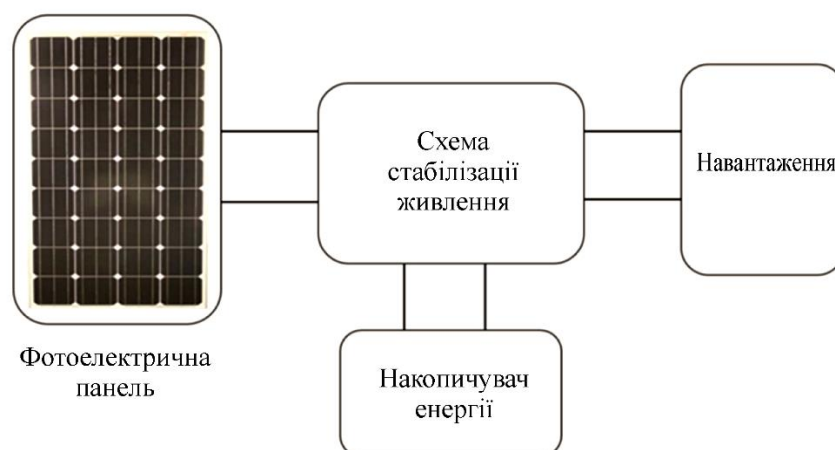


Рисунок 1.2 – Фотоелектрична система збору енергії

#### 1.4 Термоелектричний збір енергії

З розвитком технологій з'являється потреба в створенні нових джерел енергії, в тому числі і електричної. Існує безліч способів отримання електрики. Гідроенергетика займається перетворенням кінетичної енергії води в електричну. На атомних електростанціях відбувається перетворення енергії ділення ядер в теплову, а потім і в електричну енергію. Однак з появою

напівпровідникових термоелектричних матеріалів з'явилася можливість прямого перетворення теплової енергії в електричну за рахунок термоелектричних генераторів. Проблеми з енергією в мережах бездротового зв'язку нещодавно привернули значну увагу дослідницького співтовариства [1]. Бездротові системи з обмеженим енергоспоживанням, наприклад бездротові сенсорні мережі, оснащені фіксованими пристроями подачі енергії, такими як батареї, які мають обмежений час роботи та енергію. Збір енергії навколишнього середовища нещодавно розглядався для покращення стійкого терміну служби систем, наприклад, переносних комп'ютерів і сенсорних мереж тощо. Численні підходи до збору врожаю були успішно продемонстровані, включаючи вітровий, сонячний, вібраційний, біохімічний та руховий, і кілька інших наразі розробляються. Кількість енергії, отриманої з навколишнього середовища, сильно залежить від джерела енергії. Питома потужність різних технологій збирання наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.2 – Питома потужність технологій збору

Технологія збору	Питома потужності
Сонячні елементи (на вулиці опівдні)	15 мВт/см <sup>3</sup>
П'єзоелектричні (вкладиші)	330 мкВт/см <sup>3</sup>
Вібрація (мала мікрохвильова піч)	116 мкВт/см <sup>3</sup>
Термоелектричний (10°C)	40 мкВт/см <sup>3</sup>
Акустичний шум (100 дБ)	960 нВт/см <sup>3</sup>

У бездротових системах збору енергії, яка отримана для передачі даних, поступово збирається з навколишнього середовища під час передачі даних, оскільки явища, що виробляють енергію, присутні не завжди. Крім того, енергія спочатку зберігається в накопичувачі енергії, перш ніж використовуватися для передачі даних, а невикористана енергія залишається в накопичувачі для подальшого використання. Щоб отримати найкращу корисність для цього необмеженого, змінюваного в часі та неконтрольованого джерела енергії, споживанням енергії потрібно ретельно керувати відповідно до часу та обсягів

збору енергії, а швидкість передачі даних має бути відповідно адаптована. Одним із ключових параметрів, що визначають термін служби системи та, отже, її продуктивність, є ефективність, з якою накопичена енергія зберігається та використовується. Це особливо важливо в розподіленій системі збору, такій як мережа датчиків, де кожен вузол може мати різні можливості збору енергії в навколишньому середовищі, і, отже, замість того, щоб просто мінімізувати загальне споживання енергії, стає необхідним адаптувати схему керування живленням для врахування цих просторово-часові варіації .

Термоелектричні пристрої більше підходять для середовищ з перепадами температури. Перетворення енергії може бути здійснено ефективно за допомогою температурного перепаду між кінцевими матеріалами, тоді як енергія постачається тепловим потоком. Через теорему Карно та низьку ефективність матеріалу для термоелектричних пристроїв вони не забезпечують достатньо енергії, навіть коли тепловий потік значний. Таким чином, найкращі термоелектричні матеріали знаходяться в сильно легованих напівпровідниках. Існує три ефекти, за допомогою яких працюють термоелектричні пристрої: ефект Пельтьє, ефект Зеебека і ефект Томсона.

Початок XIX століття ознаменоване «Золотим віком фізики та електротехніки». Термоелектричні явища були вперше виявлені Заєбеком в 1823 році.

Ефект Зеебака є основним ефектом термоелектричної генерації, який пояснює ситуацію, коли коло, що складається з двох різних матеріалів, може створювати електрорушійну силу  $E$  (ЕРС) або різницю потенціалів. Тут для підтримки з'єднань між двома матеріалами використовуються різні температури.

В невеликому інтервалі температур  $E$  можна рахувати з достатнім рівнем точності, пропорційну різницю температур спаїв, і деякому коефіцієнту, так званий коефіцієнт диференціальної термо – ЕРС який визначається згідно виразу:

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E = \alpha_{1,2}(T_2 - T_1)$$

Або якщо точніше то:

$$-dE = \alpha_{1,2}dT$$

Коефіцієнт термо – ЕРС визначається в першу чергу матеріалами з яких складається термопара, для позначення яких ми ввели позначення 1 і 2, і також залежить від різниці температур (в деяких випадках зі зміною температури термо – ЕРС навіть змінює знак).

Пізніше, у 1834 році французький вчений Жан-Шарль Пельтьє, аналізуючи ефект Заєбека, експериментував з краплею води, поміщеній на стику двох провідників (вісмуту і сурми). При пропущенні струму в одному напрямку крапля води замерзала, а при зміні напрямку струму вона танула. За допомогою цього експерименту було встановлено, що при проходженні струму через контакт двох провідників в одному напрямку тепло виділяється, в іншому – поглинається. Дане явище було названо ефектом Пельтьє.

Ефект Пельтьє – явище виділення або поглинання тепла на контактах двох провідників при проходженні через них електричного струму.

Класична теорія пояснює явище Пельтьє тим, «що при переносі електронів струмом з одного металу в інший, вони прискорюються або сповільнюються внутрішньою контактною різницею потенціалів між металами [24]. У разі прискорення кінетична енергія електронів збільшується, а потім виділяється у вигляді тепла. У зворотному випадку кінетична енергія зменшується, і енергія поповнюється за рахунок енергії теплових коливань атомів другого провідника, таким чином він починає охолоджуватися.

Цей процес є оборотним, електричний струм може подаватися через контакт для створення градієнта температури (а отже і теплового потоку), або ж градієнт температури може використовуватися для генерування електричного струму.

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Величина тепла Пельтьє, що виділяється і його знак залежать від виду контактуючих речовин, сили струму і часу його проходження. Розмірність коефіцієнта Пельтьє:

$$[П] СІ = Дж / Кл = В.$$

Ефект Пельтьє, як і всі термоелектричні явища, виражений особливо сильно в ланцюгах, складених з електронних (n – тип) і діркових (p – тип) напівпровідників. У цьому випадку ефект Пельтьє має інше пояснення.

Сучасні модулі Пельтьє – це конструкція, що складається з двох пластин – ізоляторів (як правило, керамічних), з розташованими між ними послідовно з'єднаними термопарами. З спрощеною схемою такого елемента можна ознайомитися на представленому нижче рисунку 2.3.

Модуль Пельтьє, являє собою термоелектричний холодильник, що з послідовно з'єднаних напівпровідників p- і n-типу утворюють p-n і n-p – переходи. Кожен з таких переходів має тепловий контакт з одним з двох радіаторів. В результаті проходження електричного струму певної полярності утворюється перепад температур між радіаторами модуля Пельтьє, один радіатор працює як холодильник, інший радіатор нагрівається і служить для відводу тепла. На рис. 2.3 представлений зовнішній вигляд типового модуля Пельтьє:

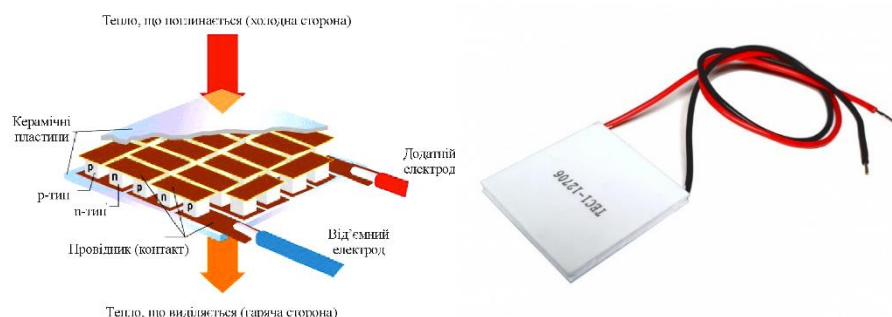


Рисунок 1.3 – Конструкція модуля Пельтьє та зовнішній вигляд ТЕМ

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Типовий модуль забезпечує значний температурний перепад, який становить кілька десятків градусів. При відповідному примусовому охолодженні нагрівуючого елемента радіатора, другий радіатор – холодильник, дозволяє досягти від'ємних значень температур. Для збільшення різниці температур можливе каскадне включення термоелектричних модулів Пельтьє при забезпеченні адекватного їх охолодження. Це дозволяє порівняно простими засобами отримати значний перепад температур і забезпечити ефективне охолодження елементів, що захищаються.

### 1.5 Збір енергії методом коливань

Ще один спосіб отримання енергії – це вібрація (коливання) або механічний рух. На рисунку 1.4 показано, що існує три механізми (електромагнітний та електростатичний, п'єзоелектричний), які можна використовувати для перетворення коливань в електричну енергію.

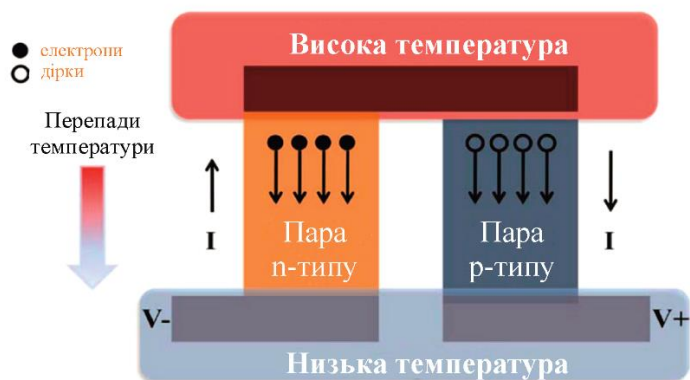


Рисунок 1.4 – Принцип роботи термоелектричного генератора

Термоелектричні прилади мають багато переваг: вони не мають рухомих частин, тому що вони твердотільні, високонадійні, акустично безшумні, електробезпечні, їх можна орієнтувати в будь-якому напрямку, вони не

утворюють пилу або інших частинок, і вони не видають електричного звуку або блимання. Крім того, вони невеликі та легкі. Основним недоліком цієї часто рекламованої технології є загалом низький коефіцієнт перетворення, який становить від 5% до 10% при нормальній щільності потужності 60 мкВт/см<sup>2</sup>. Цей недолік не має суттєвого впливу на застосування, якщо розглядати інші методи збору енергії. На рисунку 1.4 показано основні принципи роботи термоелектричного генератора (ТЕГ). При оцінці загального виходу ТЕГ, як показано нижче, використовується коефіцієнт корисної дії Карно.

$$\eta = \frac{(T_G - T_X)}{T_G}, \quad (1.2)$$

де  $T_G$  і  $T_X$  – гаряча та холодна температури, відповідно, у Кельвінах.

## 1.6 Висновки до першого розділу

В даному розділі проведено огляд літературних джерел, які пов'язані з тематикою збору радіочастотної енергії. Зазначено, що ми дозволяємо витратити енергію з суперконденсатора лише в його інтервалі часу, тоді як енергія батареї може витратитися в обидва інтервали. Описано, що ця конкретна схема дає спільно оптимальну схему передачі та витрати енергії.

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ПЕРЕТВОРЕННЯ КОЛИВАНЬ

### 2.1 Електромагнітне перетворення коливань

Електромагнітні комбайни виробляють енергію за допомогою електрорушійної сили, яку змінний магнітний потік індукує через провідну котушку відповідно до закону Фарадея [30]. Для генерації джерела магнітного потоку ( $B$ ) використовується постійний магніт. Зсув магнітного потоку, який необхідний для виникнення струму в котушці, створюється рухом сейсмічної маси, з'єднаної з магнітом або котушкою. Між кінцями провідника виникає індукція електрорушійної сили (ЕРС), коли провідник проходить крізь магнітне поле. Частка індукованої напруги, яка вироблена в провіднику ( $U$ ), як видно з виразу (2.1), пропорційна частоті зв'язку магнітного потоку ( $\Phi$ ) контуру.

$$U = -N \frac{d\Phi}{dt} . \quad (2.1)$$

Є два можливі випадки:

- лінійна вібрація;
- змінне магнітне поле,  $B$ .

При лінійній вібрації між котушкою та магнітом відбувається рух у напрямку  $x$ , що означає, що індукована напруга котушки та швидкість руху, як показано у виразі (2.2), виражаються як результат з'єднання потоку. У ситуації, коли магнітне поле змінюється в часі ( $B$ ), щільність потоку є постійною по всій площі  $A$  та котушці, тобто індукована напруга залежить від кута ( $\alpha$ ) між площею котушки та віссю щільності потоку, як показано у виразі (2.3).

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

$$U = -N \frac{d\Phi dx}{d_x d_t}, \quad (2.2)$$

$$U = -NA \frac{d_B}{d_t} \sin \alpha. \quad (2.3)$$

Щоб отримати потужність від генератора, встановлюється з'єднання між котушкою та опором навантаження  $R_H$ . Магнітне поле створюється струмом, яке індукується в котушці; крім того, магнітне поле паралельне магнітам, які розроблені на основі правила електромагнітної індукції постійними магнітами Фарадея Ленца. Результатом цієї електромагнітної індукції є електрорушійна сила  $F_{EPC}$ , що суперечить генераторному двигуну, за допомогою якого механічна енергія перетворюється на електричну. Електрорушійна сила  $F_{EPC}$  описана в рівнянні (2.4); вона також пропорційна струму і швидкості.

$$F_{EPC} = D_{EPC} \frac{dx}{dt},$$

$$D_{EPC} = \frac{1}{R_H + R_C + j\omega L_C} \left( \frac{d\phi}{dx} \right)^2, \quad (2.4)$$

де  $D_{EPC}$  – електромагнітне затування,  $R_H$  – опір навантаження,  $R_C$  – опір котушки,  $L_C$  – індуктивність котушки,  $d/dx$  – магнітний потік.

Таким чином, електромагнітне затування  $D_{EPC}$  і швидкість повинні бути максимізовані конструкцією генератора, щоб отримати максимальну вихідну електричну потужність. Якщо електромагнітне затування збільшується, то з'єднання потоку максимізується, а імпеданс котушки підвищується. Зчеплення потоку залежить від сили магнітів, їхнього відносного розташування на котушці та напрямку їхнього руху, а також від площі та кількості обертів котушки.

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.2 Електростатичне перетворення вібрації

Електричні пристрої складаються зі змінних конденсаторів, пластини яких електрично розділені повітрям, вакуумом або ізолятором; зазор між пластинами різний через зовнішню механічну вібрацію, що спричиняє зміну ємності. Для збору енергії тут необхідно зарядити пластини. За таких обставин електростатичним силам у пристрої протидіють механічні коливання. Таким чином, якщо напруга  $U$  зміщує конденсатор, і якщо схема навантаження лінійна, електрична потужність виробляється рухом рухомого електрода.

Електростатична енергія має кілька переваг порівняно з іншими методами збору енергії вібрації. Деякі з цих переваг включають широкий діапазон налаштування, менший рівень шуму, високий коефіцієнт добротності  $Q$  і обмежений розмір. Тим не менш, енергія, вироблена електростатичними пристроями, менша, ніж енергія, вироблена іншими кінетичними пристроями, і через їх робочі особливості вони мають обмежену кількість функціональних можливостей.

Механічна дія пристрою заснована на основній стороні моделей перетворювача. Джерелом вібрації є джерело напруги, маса представлена конденсатором, котушка індуктивності є пружиною, а резистор відображає паразитне демпфування (гасіння). Вторинна сторона містить електричні елементи генератора, де ємність клеми п'єзоелектричного матеріалу або рухомого конденсатора визначається конденсатором.

Механізм електростатичного перетворення залежить від змінного конденсатора мікроелектромеханічної системи (МЕМС). Попередньо заряджений конденсатор поміщається в систему таким чином, щоб зміщувати розташування провідників шляхом механічного руху, даний конденсатор складається з цих провідників. Змінність напрямку провідників дозволяє зміщувати значення ємності. Таким чином, відбувається зміна енергії, яка накопичується в конденсаторі, оскільки механічна енергія перетворюється на

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

електричну. Конденсатор також можна використовувати для утримання переданої енергії або як зовнішнє навантаження. Оскільки перед використанням конденсатор повинен бути заряджений, цей тип системи потребує іншого джерела напруги.

### 2.3 П'єзоелектричне перетворення коливань

У п'єзоелектричних пристроях механічні елементи, такі як мембрани або балки, згинаються, щоб забезпечити генерацію енергії. Результируючі механічні коливання передаються від десятків до сотень герц на резонансних частотах. У динамічній системі багато факторів, у тому числі дисбаланс ваги та зношеність компонентів, викликають вібрацію твердого тіла. Кожна система діє унікальним чином, що можна пояснити константою демпфування та власною частотою. Механізм із зосередженою пружинно-масовою ступенем свободи досліджує динамічні властивості вібраційного тіла, пов'язані зі збором енергії. Таким чином, фундаментальні принципи резонансної інерційної вібрації пристрою можуть бути визначені за допомогою зосередженої моделі. Рівняння руху системи визначається теорією Даламбера щодо рівняння енергетичного балансу, отриманого диференціалом, як видно з виразу (2.75).

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + D_v \frac{dz}{dt} + kz + F = -\frac{d^2 Z}{dt^2}, \quad (2.5)$$

де  $m$  – сейсмічна маса,  $D_v$  – коефіцієнт в'язкого демпфування (згасання),  $k$  – пружина жорсткості,  $F$  – сила, а  $z(t)$  – місце рівноваги.

Оскільки виробництво енергії залежить від процесу відносного руху між масою та інерційною системою, вираз (2.6) забезпечує стандартне рішення для стаціонарного переміщення маси:

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$z(t) = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{D_v \omega}{m}\right)^2}} Y \sin(\omega t - \Phi), \quad (2.6)$$

$$\Phi = \arctan\left(\frac{D_v \omega}{k - \omega^2 m}\right),$$

де  $\omega$  – частота, а  $Y \sin(\omega t - \Phi)$  – розв’язок для  $z(t)$ , де  $Y (Y = A / \omega^2)$  – зміщення амплітуди, а  $\Phi$  – фазовий зсув. Максимальна енергія системи досягається, коли частота збудження пропорційна власній частоті системи  $\omega_n$ , визначається рівнянням (2.7):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (2.7)$$

Максимальна потужність може бути вироблена, і, отже, вихідна потужність може бути забезпечена виразом (2.8), лише коли рівняння зсувається на його нормальній частоті.

$$P_{\max} = \frac{mY^2 \omega_n^3}{4\zeta_T}. \quad (2.8)$$

Пікова потужність позначається  $\omega_n$ , тоді як коефіцієнт демпфування позначається  $\zeta_T$ . Величина збуджувальних коливань і вплив частоти, що використовується, повинні враховуватися разом із максимальною масою зміщення. Достатньо високе вхідне прискорення спричиняє збільшення демпфування, що розширює смугу пропускання; Таким чином, створюється генератор, який менше реагує на коливання частоти збудження. У

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



бездротовим способом, коли радіочастотні сигнали збираються з навколишнього середовища. Крім того, фактори навколишнього середовища, такі як погода та температура, не впливають на поглинання радіочастот, і це важливо для WBAN. Нижче наведено різні джерела навколишнього радіочастотного випромінювання:

- діапазон АМ-радіо (550 кГц–1605 кГц);
- діапазон FM-радіо (87,5 МГц–108 МГц);
- ТВ діапазон (41 МГц–950 МГц);
- діапазон GSM (0,85–0,90 ГГц, 1,8–1,9 ГГц);
- смуга множинного доступу з кодовим розділенням (CDMA) (450–2100 МГц);
- діапазон 3G (1,8–2,5 ГГц);
- діапазон 4G (2–8 ГГц);
- діапазон ISM (2,4 ГГц);
- діапазон WIFI (2,45 ГГц–5,8 ГГц).

Антену використовують для збору радіосигналів з атмосфери під час поглинання радіочастотного спектру. У системі є схеми узгодження імпедансу, які підходять до решти контуру антени, тим самим запобігаючи виникненню відбиттів. Після захоплення радіочастотних сигналів вони перетворюються на постійний струм за допомогою різних доступних підходів, які залежать від програм (додатків). Потім модифікований сигнал перенаправляється в додатках бездротової телемережі (WBAN) на пристрій керування енергією.

Потужність, яку можуть отримати системи поглинання радіочастотної енергії, залежить від коефіцієнта підсилення антени, потужності джерела та відстані між джерелом і антеною. Щільність випромінювання навколишнього радіочастотного випромінювання становить  $0,0002\text{--}1$  мкВт/см<sup>2</sup>. У порівнянні з іншими методами поглинання цей діапазон вихідної потужності є порівняно низьким. Чутливість до відстані є ще одним ключовим моментом, який слід враховувати при поглинанні радіочастот. У таблиці 2.1 наведено рівні енергії, ефективність та обмеження різних джерел радіочастот. Незважаючи на це,

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

здатність методу поглинання радіочастот завжди захоплювати радіочастотні сигнали як у зовнішньому, так і в приміщенні робить його привабливим для мереж WBAN. Крім того, підхід поглинання радіочастот стає все більш важливим для майбутніх реалізацій завдяки можливості інтеграції антени, а також розвитку методів проектування антени.

Таблиця 2.1 – Порівняння поглинання енергії радіочастот (РЧ) для різних частот

Джерело	ККД, %	Рівень енергії	Обмеження
РЧ-GSM	Низький	мВт	0–100 м
РЧ-телебачення	Низький	мкВт	0–4 км
РЧ WI-FI	Низький	нВт-мкВт	0–10 м
РЧ-AM	Низький	мкВт- мВт	0–20 км

## 2.6 Гібридний збір енергії

Оскільки навколишні джерела, які можна зібрати, не є постійно доступними, нерозумно покладатися лише на одне джерело, оскільки це обмежує надійність і функціональну здатність вузла датчика, що може повністю припинити роботу вузла. Сенсорний вузол може збирати енергію з кількох джерел, що обертаються, таким чином дозволяючи сенсорним вузлам оптимально використовувати енергію навколишнього середовища.

Сенсорний вузол може бути обладнаний декількома модулями збирання, що дає змогу збирати енергію з кількох джерел (збір із кількох джерел). За допомогою цієї системи можна збирати вітрову та сонячну енергію; також використовується система відстеження точки максимальної потужності (MPPT), яка складається з двох суперконденсаторів по 22 Ф і літій-полімерної батареї ємністю 70 мА·год, яка служить підпорядкованим буфером. Пристрій сонячної панелі має максимальний вихідний струм і напругу 3,75 і 2,5 відповідно, що

еквівалентно Helimote, від 4,0 В до 100 мА. Вихідна потужність панелі може становити 400 мВт

Оскільки гібридне очищення є нещодавньою розробкою, у майбутньому очікується високопродуктивне виробництво та підвищення надійності кількох гібридних систем. Крім того, більшість досліджень, проведених у цій галузі, зосереджені на інтеграції всіх підходів до збирання в один контур заряди сприяння видобутку максимально доступної енергії, усунення використання батарей у WBAN або збільшення їх дальності і можливості зв'язку. Система поєднує в собі термоелектричний генератор (ТЕГ), а також вібраційні електромагнітні (ЕМ) і п'єзоелектричні перетворювачі (ПЗП). На рисунку 2.2 показана будова пристрою. Крім того, в таблиці 2.2 наведено основні характеристики методу збору, а потім методи порівнюються з точки зору їх недоліків і переваг; кожна техніка також коротко описана.

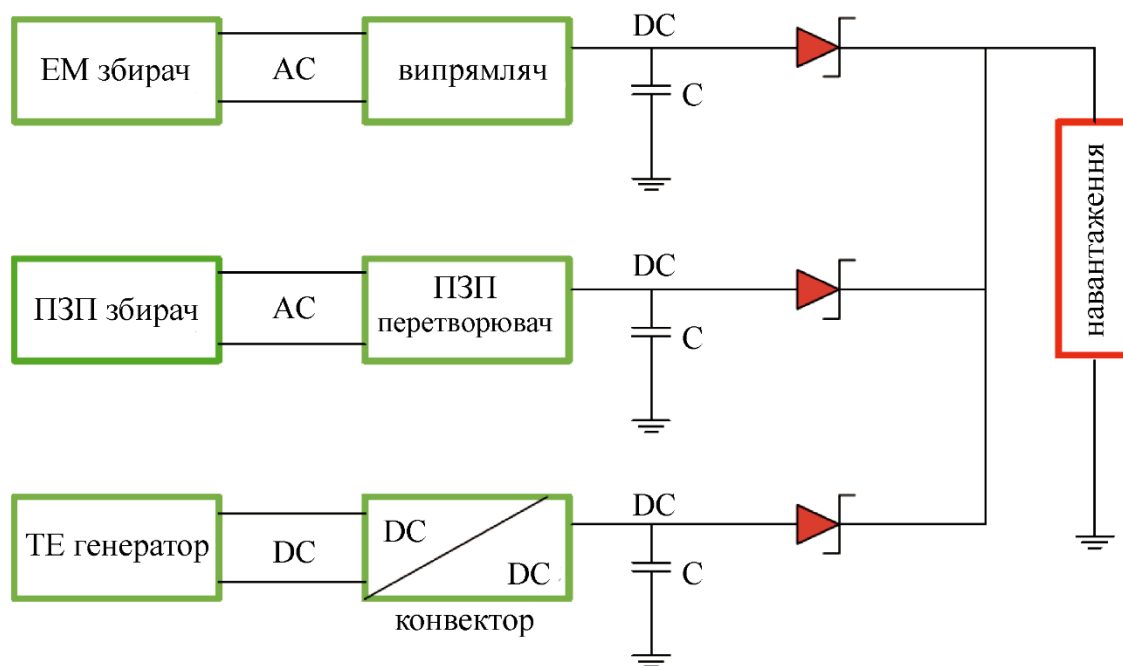


Рисунок 2.2 – Структура гібридного пристрою з трьома джерелами.

ТЕ: термоелектричний; ЕМ: вібраційний електромагнітний;

ПЗП: п'єзоелектричний перетворювач



### 3 ВИПРЯМЛЯЮЧА АНТЕНА

Випрямляюча антена або ректенна, яка здатна перетворювати радіочастотну енергію в постійний струм, зазвичай використовується в системах бездротової передачі енергії, а також у системах збору радіочастотної енергії. Таким чином, випрямляюча антена, як правило, відповідає за визначення загальної ефективності перетворення потужності (ЕПП) радіочастоти в постійний струм. Високу ЕПП можна досягти за допомогою двох підходів. Тим не менш, зазвичай застосовуваний метод полягає в поглинанні максимальної потужності та передачі її в коло. Для досягнення цього можна застосувати використання широкосмугових антен, великих антенних решіток тощо, за винятком великих розмірів.

У другому способі використовується фільтр низьких частот між випрямлячем і антеною. Крім того, гармонічні антени відхилення можуть бути розроблені таким чином, щоб нелінійні елементи, які присутні у випрямлячі, не перевипромінювали сигнали. Випрямляч в основному складається з узгоджувальної схеми, фільтра придушення гармонік, антени, помножувача напруги та навантаження, як показано на рисунку 3.1. Антена може приймати навколишні/спеціальні радіочастотні сигнали, і використання схеми узгодження використовується для узгодження необхідного опору антени схеми для досягнення високої продуктивності. Крім того, схему узгодження можна використовувати як фільтр для усунення повторно випромінюваних сигналів.

Сигнали змінного струму перетворюються на постійний за допомогою випрямляча, а вихідна напруга визначається кількістю множників схеми помножувача. Використання помножувачів напруги потрібне, щоб вихідний постійний струм можна було підвищити, оскільки амплітуда вихідної напруги постійного струму більша за амплітуду отриманого радіочастотного сигналу. Основною проблемою, пов'язаною з конструкцією випрямляючої антени, є ефективність перетворення потужності. Ефективність перетворення випрямляча

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

вимірюється ефективністю перетворення потужності. Ефективність перетворення потужності використовується для вимірювання ефективності випрямляючої антени для перетворення отриманої радіочастотної енергії в постійний струм.

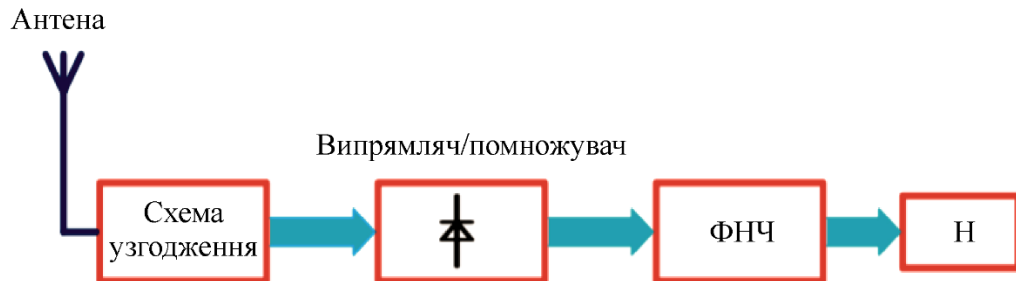


Рисунок 3.1 – Блок-схема схеми збору енергії радіочастот (РЧ-ЕН)

Ефективність перетворення радіочастоти в постійний струм представлено виразом (3.1):

$$\eta_{PЧ-DC} = \frac{P_{DC}}{P_{PЧ}}, \quad (3.1)$$

де  $P_{DC}$  – вихідна потужність постійного струму, а  $P_{PЧ}$  – вхідна радіочастотна (РЧ) потужність.

Вхід випрямляча змінюється залежно від сили та частоти падаючої хвилі, що викликає різницю в опорі діода. В результаті цієї зміни виникає невідповідність імпедансу, що призводить до зниження ефективності перетворення потужності. На ефективність перетворення систем РЧ-ЕН впливають кілька факторів, зокрема такі:

- Доступність РЧ-потужності при непередбачуваних інцидентах;
- Втрати для кожного компонента;
- Мінімальна чутливість пов'язаної схеми;

- Обмежена загальна потужність випромінювання;
- Відстань між передавачем і приймачем;
- Висока нелінійна залежність вихідної напруги від вхідної при малих вхідних потужностях;
- Зміна вихідного опору антени через зміну падаючої потужності та частоти, що призводить до втрат на невідповідність;
- Компроміс між пропускнуою здатністю та ефективністю завдяки мініатюризації.

У вже відомому дослідженні [31], була представлена та реалізована випрямляюча антена з найкращим компромісом між компактністю та високою ефективністю радіочастоти до постійного струму для низьких рівнів щільності падаючої потужності ( $<5$  мкВт/см<sup>2</sup>). У дослідженні [32] було представлено новий компактний надважкий багатосмуговий збирач радіочастотної енергії, виготовлений на паперовій підкладці. Нова конструкція ректени була запропонована в [33] для збору сонячної та радіочастотної енергії. У [34] запропонували та реалізували концепцію адаптивного випрямляча для вирішення проблеми раннього збою, яка виникає у звичайних випрямлячах, демонструючи при цьому високий рівень ефективності в широкому діапазоні рівнів вхідної радіочастотної потужності. Автори у [35] запропонували нову систему ректен, яка могла одночасно досягти багатонаправленого прийому та масштабованості. У цій роботі потужність, що генерується антенами з різною шириною променя половинної потужності, оцінювалася за допомогою техніки трасування променів.

Новий, компактний, надважкий збирач радіочастотної енергії для роботи в промисловому, науковому та медичному радіодіапазоні 2,4 ГГц. У роботі [36] запропоновано ректену, що імплантується на руку; легка перевернута планарна F-антена та випрямляч також були оснащені плановою ректеною. Дослідники запропонували використовувати ректену в діапазоні медичних пристроїв (401–406 МГц) і в промислових, науково-дослідних і медичних діапазонах

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(902,8–928 МГц) для забезпечення бездротової телеметрії даних і потужності передачі. Новий, низькопрофільний планарний диполь, що імплантується, був представлений Лесником, Верховським, Мізрахі, Мілгромом і Харідімом, у якому складчаста ділянка меандру була включена в запропонований диполь. У цій статті було зроблено два нових внески: по-перше, було використано спеціально підібрану складчасту меандрову ділянку; по-друге, було виконано заміну лише частини кожного прямого рукава на меандрову секцію. У таблиці 3.1 наведено короткий перелік різних типів ректен на сучасному рівні.

Таблиця 3.1 – Порівняння відомих досліджень випрямляючих антен

Антенa	Частота (ГГц)	Підсилення (дБі)	Діод	ККД (%)	Розмір (см × см)	Навантаження	Pin (дБм)
Випрямляюча антенa з компромісом між компактністю та високою ефективністю РЧ до DC	0.86	2.6	HSMS2850	24.2 37	11.0 × 06.0	5.0	--
Компактний надважкий багатосмуговий збирач РЧ енергії	0.90	1.3	HSMS2850	40.0	11.0 × 11.0	3.0	-20
Ректена для збору сонячної та РЧ енергії	2.45	6.24	SMS7630	18–32	--	3.3	-20...-10
Адаптивний випрямляч	0.915	2	HSMS-2850	66.0	30 × 17	1.0	-06...32
Техніка трасування променів	2.45	9	HSMS-286C	10–39	75 × 40	--	15
Збирач на гнучкій підкладці	2.45	0	SMS-7630	9–24	15.1 × 8.15	1.0	-20
Ректена, що імплантується на руку	0.915	-24.3	Шоттки з нульовим упередженням	--	16.0 × 14.0	2.0	-10
Низькопрофільний планарний диполь	0.401– 0.406	-23.7	--	--	34.3 × 1.95	--	8.6

### 3.1 Антенa

Антенa – радіотехнічний пристрій для приймання і передавання електромагнітних хвиль.

Передавальна антенa перетворює електричний струм радіочастотного діапазону на електромагнітні хвилі відповідної частоти. Відповідно приймальна антенa перетворює електромагнітні хвилі на струм відповідної форми. Приймальна антенa від передавальної відрізняється лише застосуванням.

Дія елементарної антени основана на дипольному випромінюванні. Сигнал, який передається на антену від високочастотного генератора, створює в ній коливання густини заряду, що призводить до випромінювання електромагнітних хвиль. Відповідним чином при прийманні сигналу електромагнітні хвилі наводять в антені струми, які потім підсилюються і демодулюються приймачами.

Антенa є однією з основних частин мережі WLAN. З належним чином сконструйованою антенною системні вимоги можуть бути послаблені, а загальна продуктивність системи покращена. Класичним прикладом цього є телебачення, для якого можна використовувати високоефективну антену для покращення загальної продуктивності прийому трансляції. Як очі для людини, так і антенa для систем зв'язку.

Антенa є ключовим компонентом систем збору радіочастотної енергії, і існують різні види антен. Класифікація антен базується на підсиленні антени, поляризації, смузі частот, діаграмі спрямованості, області застосування та фізичних розмірах тощо. Наприклад, для різних частотних діапазонів, таких як дуже висока частота (ВЧ) і надвисока частота (НВЧ), використання спеціальних антен може мати велику користь.

Деякі з популярних типів антен включають рамкову, рупорну, дипольну, апертурну, решітку, мікросмужкову та логперіодичну антени. Ефективність перетворення радіочастотного сигналу в електричний розраховується за підсиленням антени в певному напрямку.

Антени з високим коефіцієнтом підсилення є найбільш бажаними, оскільки вони підвищують продуктивність перетворення, а також кількість енергії, яку вони збирають. Підсилення антени має велику вартість. Випромінювання антени може бути ізотропним або спрямованим. Якщо джерело радіочастотного сигналу встановлено, кількість отриманої енергії може бути покращена за допомогою спрямованої антени. Однак, якщо місцезнаходження невідоме, використовується ізотропна антенa. Орієнтація електричного поля в

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

точці спостереження визначається поляризацією антени. Підвищення ефективності перетворення відбувається, коли одна й та сама поляризація має як передавальну, так і приймальну антени.

Існує чотири типи поляризацій, включаючи вертикальну, горизонтальну, еліптичну та кругову.

Весь розподіл електромагнітної енергії в області навколо збиральної антени існує в різних спектральних діапазонах. Як зазначалося раніше, спектральні вимірювання використовуються для визначення перспективної смуги або смуг частот. Вибір конструкції діапазону (широкосмугового, багатосмугового або односмугового), який буде використовуватися для збору радіочастотної енергії, визначається на основі результатів вимірювань. Процес проектування та виготовлення однодіапазонної антени простий, але енергія, що збирається однодіапазонною антеною, менша, ніж енергія багатодіапазонної антени. Однак вихідна напруга постійного струму РЧ потужність пристрою збільшується, коли коло пристрою налаштоване на багаточастотну конструкцію. Найбільш підходящим типом антени для збору потужності з широкого частотного діапазону є широкосмугова антена, але її коефіцієнт підсилення антени зменшується, коли вона знаходиться далеко від центральної частоти. Крім того, важко досягти узгодження імпедансу в широкому діапазоні. Коли потрібно зібрати більше потужності, використовується кілька антен, і ефективність перетворення радіочастоти в постійний струм підвищується за рахунок цієї більшої потужності, що збирається, але коли ступені помножувача та кількість антен збільшується, також буде відбуватися підвищення ефективності, а також загального розміру схеми.

Слід зауважити, що ефективність можлива для підвищення зібраної енергії, але будь-яке збільшення зібраної енергії не гарантує збільшення ефективності. Наприклад, робота двох подібних антен, що працюють у системі збору енергії з однаковою смугою частот, збільшить кількість зібраної енергії. Тим не менш, вихід системи в цьому випадку залишається незмінним. Розробили

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

недорогу подвійну КП-антену з послідовним живленням, надруковану на одношаровій друкованій платі для додатків ММ-хвиль. У [25] була представлена паралельна пластинчаста антенна решітка з інтегрованим хвилеводом на частоті 94 ГГц. За допомогою запропонованої антени промені з подвійною круговою поляризацією (КП) з низьким рівнем бічних пелюсток (РБП) можуть бути створені з однієї випромінюючої апертури. У [26] запропонували масштабовану антенну решітку з подвійною круговою поляризацією з високим підсиленням для додатків на частоті 60 ГГц.

У дослідженні, [27], антенні решітки в діапазоні 28 ГГц були запропоновані для застосувань міліметрових хвиль (mm-wave). Нова низькопрофільна антена з подвійною КП-планарною апертурою була запропонована в [28], антена характеризується широкою смугою пропускання, високим коефіцієнтом підсилення та чудовим осьовим відношенням для додатків на частоті 60 ГГц. На основі запропонованої антени розроблено нову схему побудови подвійної поляризації.

Широкосмугова багатомікросмугова дипольна антена з подвійною поляризацією була запропонована в [29]. Нову широкосмугову подвійну поляризовану антену з вбудованим монтажем [30], антена має дуже високу ізоляцію. Низькопрофільний антенний елемент із подвійним поляризованим ступінчастим опором, що живиться мікросмугами. У [31] було об'єднано техніку диференціального живлення та запропоновано подвійну поляризовану щільну антену. Запропонована антена характеризується високою ізоляцією, узгодженою діаграмою спрямованості та XPD, ці характеристики є бажаними у застосуваннях базових станцій. В [32] представили бездротову антену з перехресними щільностями. Навантаження індуктивності задані в антені для подвійної поляризації. Автори досліджували вплив розміру землі на опір. Компактного розміру можна досягти, використовуючи дуже маленьку землю, яка має таку саму довжину гіпотенузи, як і проріз. У таблиці 3.2 подано короткий виклад порівняння попередніх досліджень антен.

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 – Порівняння досліджень антен

Антенa	Частота (ГГц)	Пропускна здатність	Підсилення (дБi)	Ізоляція (дБ)	Розмір ( $\lambda_0$ )	ККД (%)
Подвійна КП-антенa з послідовним живленням	30	29.13–31.10 6.57%	11.8	20	03.5 × 02.8	--
Паралельна пластинчаста антенна решітка з інтегрованим хвилеводом	94	93.5–94.5 0.5%	26.0	15	10.3 × 10.3	57.5
Антенна решітка з подвійною круговою поляризацією	60	55–69 23%	25.8	14	6.53 × 6.53	80
Антенні решітки в діапазоні 28 ГГц	28	27.7–28.8 3.9%	13.5	--	6.53 × 5.93	--
Низькопрофільна антенa з подвійною КП-планарною апертурою	60	57.2–64.2 11.5%	13.7	20	10.0 × 14.4	--
Широкосмугова багатомікросмугова дипольна антенa з подвійною поляризацією	1.68–2.75	48% $ S_{11}  < -10$ dB	8.9 ± 0.7	>37	0.78 × 0.78	82
Широкосмугова подвійна поляризована антену з вбудованим монтажем	2.2	47% $ S_{11}  < -10$ dB	~7.0	>40	1.05 × 1.05	--
Низькопрофільний антенний елемент із подвійним поляризованим ступінчастим опором	1.69–2.5	31.2% $ S_{11}  < 10$ dB	~13.7	>30	1.33 × 1.33	~87.7
Подвійна поляризована щілинна антенa	3.14–3.81	19.3%/20.3% (VSWR < 1.5)	~8.1	>43	0.49 × 0.49	83
бездротова антенa з перехресними щілинами	1.56–2.78 1.46–2.73	56.2%/60.6% $ S_{11}  < 10$ dB	8.05 ± 0.45	>26	0.44 × 0.44	90

### 3.2 Типи антен

Існують різні типи антен, деякі з них представлені на рисунку 3.2.

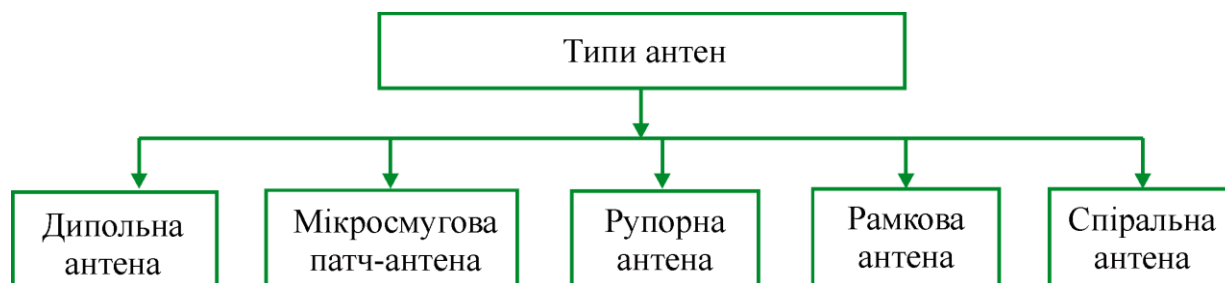


Рисунок 3.2 – Типи розглянутих антен

### 3.2.1 Дипольна антена

Дипольна антена є найпоширенішою антеною, що використовується в телекомунікаціях, і складається з двох послідовно з'єднаних металевих стержнів і фідера. Загальна довжина двох металевих стрижнів дорівнює половині довжини хвилі радіочастотного сигналу або одній чверті довжини хвилі кожного металевого стрижня, що визначає резонансну частоту антени. На рисунку 3.3 а показана повна порівняльна схема дипольної антени. Перетворення імпедансу в опір відбувається, якщо антеною приймається сигнал на резонансній частоті. На рисунку 3.3 б показана проста схема еквівалентної антени, що працює на резонансній частоті.

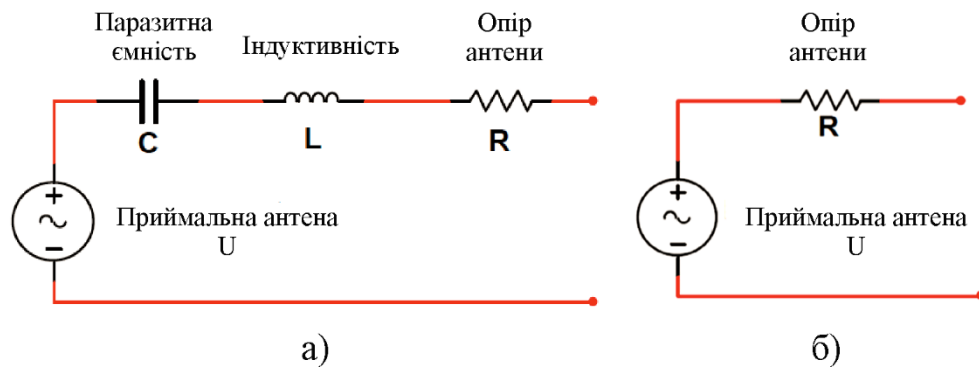


Рисунок 3.3 – Дипольна антена: а) еквівалентна схема повної дипольної антени, б) проста дипольна еквівалентна схема антени для роботи на резонансній частоті.

### 3.2.2 Мікросмугова патч-антена

Патч-антена – це оригінальний тип мікросмугової антени, це тип антени з низьким профілем, який можна встановити на поверхню. Антена складається з плоского прямокутного, круглого, трикутного або будь-якої іншої геометричної

форми металевого аркуша (який називається «патч»), встановленого поверх металевого листа більшого розміру, який називається заземленою площиною

На рисунку 3.4 показано, що мікросмужкова антена складається з ділянок випромінювання, заземленої поверхні, діелектричної підкладки та точки живлення, які можна використовувати різними способами. Розміри випромінювача, товщина ( $h$ ), ширина ( $W$ ) і довжина ( $L$ ) визначають смугу пропускання, резонансну частоту та ефективність мікросмугової антени. Поляризація, номер смуги частот, підсилення антени та ширина смуги – усе це визначається формою випромінювача (прямокутна, кругла, квадратна), а також техніку живлення.

Були розроблені плани різних типів методів для покращення пропускну здатності мікросмугових топологій:

- (I) модифікації патчів, що створюють складні конструкції для змішування різних резонансних діапазонів частот,
- (II) додавання слотів для патчів радіатора,
- (III) введення паразитних компонентів у шар латки радіатора та
- (IV) коригування технологій живлення.

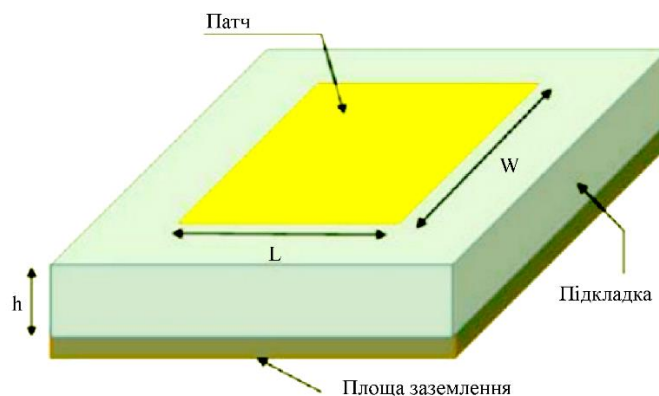


Рисунок 3.4 – Базова конструкція прямокутної мікросмугової антени

Для мікрохвильових частот, особливо в діапазоні 2,4 ГГц і вище, патч-антена є корисною. Ця антена складається з однієї сторони друкованої плати з

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

геометричним покриттям і площиною заземлення за межами випромінювання. Найпоширеніші конструкції цієї антени включають круглу та прямокутну форми. Однак іноді використовуються інші конструкції, наприклад трапеція. Плата піддається надмірному випромінюванню. Квадратна напівхвильова патч-антена потрібна для діапазону від 7 до 8 дБ.

Прямокутна патч-антена показана на рисунку 3.4. Розмір  $L$  становить приблизно половину довжини хвилі, яка визначається як половина довжини хвилі вільного простору ( $\lambda$ ), розділеної квадратним коренем з ефективної діелектричної проникності ( $\epsilon$ ) речовини плати. Вплив випромінювання від двох протилежних країв ділянки, розташованих на  $L$  один від одного, і від площини землі значно менший за половину довжини хвилі. Радіація не виходить з двох інших областей, оскільки вони надходять, розташовані на центральній лінії. Фідер мікросмугової подачі можна спостерігати на рисунку 3.4, і оскільки він прикріплений до накладки на платі поряд з іншими елементами, що знаходяться на тому самому боці, він кращий перед іншими конструкціями. Ширина ділянки визначає імпеданс у точці живлення.

Мікросмуга перетворює імпеданс у найкращий імпеданс навантаження (для передавача) або джерела (для приймача). Точку живлення можна перемістити від краю центральної лінії до середини плати, щоб безпосередньо підібрати лінію передачі для імпедансу точки живлення. Таким чином можна встановити пряме з'єднання між коаксіальною лінією передачі на 50 Ом і нижньою стороною патч-антени. У цьому випадку провідник проходить до точки живлення, тоді як екран з'єднаний із заземленням.

### 3.2.3 Рупорна антена

Рупорна антена – антена, яка являє собою металевий хвилевід, сформований у вигляді рупору, яка спрямовує радіохвилі у пучок. Як правило, рупорні антени збуджують хвилеводом, приєднаним до вузького кінця рупору.

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Рупорна антена відображає передачу або еквівалентну складову від спрямованого режиму в хвилеводі до ненаправленого (вільного простору) режиму хвилеводу. Рупорна антена зменшує відбиття як узгоджувальний компонент, що призводить до зменшення коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ).

Рупорні антени мають три типи, як показано на рисунку 3.5: а) секторний рупор Е-площини (розширений лише в напрямку Е-площини, б) секторний рупор Н-площини (розширені тільки в напрямку Н-площини), та г) пірамідальна рупорна антена (розширена як у площині Е, так і в площині Н). Тут припущення полягає в тому, що відблиск є лінійним, хоча формування деяких рогів здійснюється за допомогою інших видів спалахів. Прикладом останнього є експоненціальний спалах.

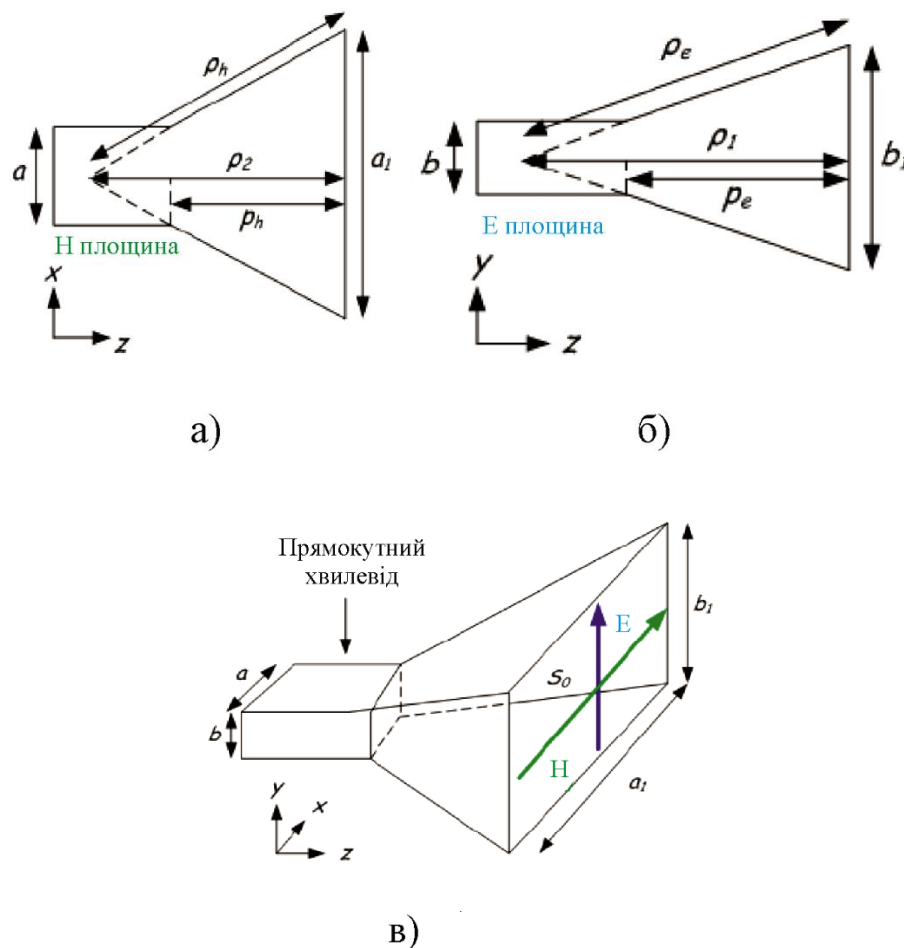


Рисунок 3.5 – Рупорна антена: а) Н-площина, б) Е-площина і в) прямокутний рупор.

Рупорна антена встановлена на хвилеводі, який майже безперервно збуджується в одномодовому режимі. Іншими словами, робоча частота хвилеводу вище граничної частоти режиму  $TE_{10}$ , але нижче граничної частоти наступної найвищої моди. Рупор зазвичай використовується для зв'язку, антен, великомасштабної радіоастрономії та супутникового спостереження. Це пов'язано з тим, що рупор простий у виготовленні, він має велике підсилення та в цілому добре працює. Кінець хвилеводу можна розширити різними способами, щоб створити різноманітні рупори. Наприклад, секторний рупор можна створити шляхом розширення площин  $E$  і  $H$ . Також, пірамідальний рупор може бути сформований, коли хвилевід розширюється в обох вимірах, або конічний рупор може бути виготовлений шляхом розширення круглого хвилеводу.

### 3.2.4 Рамкова антена

Рамкова антена, направлена антена, виконана у вигляді одного або декількох плоских витків дроту, створюючих рамку круглої, квадратної або прямокутної форми.

Популярність рамкової антени полягає в її застосуванні в ручних передавачах, тим більше, що її можна зробити за схемою невеликої плати. Її також широко використовують, так як вплив навколишніх провідних об'єктів менший, ніж інші низькорезонансні антени. Найбільшим обмеженням цієї антени є те, що вона неефективна. Струм рамкової антени з вимірюваннями меншими за довжину хвилі менше  $0,1 \lambda$  є постійним. Рівняння (3.2), наведене нижче, є виразом поля випромінювання:

$$E(\theta) = \frac{120\pi^2 \cdot I \cdot A \cdot N}{r\lambda^2} \cos \theta, \quad (3.2)$$

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $A$  – зона рамки (петлі),  $I$  – струм,  $r$  – відстань,  $\theta$  – кут до площини петлі –  $\theta$ , а  $N$  – кількість петель в корпусі багаторазові петлі.

Стійкість до випромінювання впливає з такого виразу (3.3):

$$R_r = 320\pi^2 \cdot \frac{(A \cdot N)^2}{\lambda^4} \quad (3.3)$$

У портативних дистанційних передавачах, що працюють на низькому рівні надвисоких частот (НВЧ), як правило, використовуються рамкові антени. Вони зазвичай визначаються радіаційною стійкістю нижче 10% і ефективністю (ККД) нижче 10%. Тут використовується конденсатор на виводах петлі, щоб можна було створити паралельний резонанс для узгодження вихідного каскаду передавача з низьким опором антени. Незважаючи на те, що може здатися, що в цьому підході підвищення ефективності та радіаційної стійкості відбувається при збільшенні площі петлі або кількості витків, цей підхід пропонує обмежені можливості. Індуктивність петлі збільшується зі збільшенням витків або площі, тому потрібно менше значення резонансної ємності. Коли резонансна ємність дорівнює різним пікофарадам, підхід досягає межі. Погана продуктивність цього підходу робить його непривабливим для використання в НВЧ приймачах на короткій відстані. Перевагою рамкової антени є те, що вона не потребує заземлення.

### 3.2.5 Спіральна антена

Спіральна антена – це антена, що складається з провідника у формі спіралі та призначена для випромінювання вздовж осі спіралі або перпендикулярно їй.

Спіральна антена відноситься до галузі радіотехніки, а саме до антенної техніки, що стосується широкосмугових антенних решіток, які містять два та

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більше елементарних випромінювачі, призначених для формування спеціальних радіопеленгаційних діаграм спрямованості (ДС) в широкій смузі робочих частот.

Порівняно з рамковою антеною, спіральна антена може дати кращі результати щодо ефективності випромінювання. На відміну від диполя або чвертьхвильової заземленої площини, антена є відносно невеликою.

Спіральна антена складається з пружини, діаметр якої набагато менший за довжину хвилі, або з намотуваного дроту циліндричної форми, як показано на рисунку 3.6. Ця спіральна обмотка створює очевидну осьову швидкість разом із котушкою, яка нижча за швидкість розповсюдження вздовж прямого дроту, що є майже швидкістю світла у вакуумі.

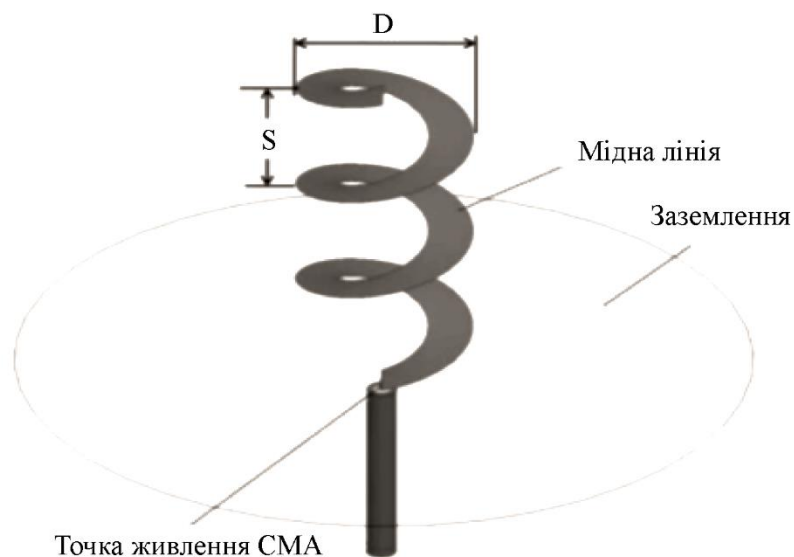


Рисунок 3.6 – Стандартна спіральна антена  
(СМА – субмініатюрна версія А)

Таким чином, чверть хвилі буде набагато коротшою на спіральній конструкції, ніж на прямому дроті. Довжина достатня для антени, але стійкість до випромінювання менше; таким чином, ефективність звичайної чвертьхвильової антени нижча. Довжина дроту в області половини довжини хвилі викликає резонанс спіральної антени. Імпеданс передавача або приймача досить легко узгодити. Поляризація спіральної антени є еліптичною, оскільки її

						КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
							48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

випромінювання має як горизонтальну, так і вертикальну складові. Тим не менш, для популярних форм-факторів, де довжина антени набагато більше її діаметра, поляризація вертикальна. Для передбачуваної та оптимальної роботи спіральної антени вона повинна володіти хорошою площиною заземлення. У портативних пристроях тіло і руки користувача служать противагою, і, таким чином, конструкція антени повинна бути виконана таким чином, щоб відповідати цій конфігурації.

### 3.3 Висновки до третього розділу

У даному розділі розглядається випрямляюча антена, яка використовується в системах бездротової передачі енергії, у системах збору РЧ енергії, та здатна перетворювати РЧ енергію в DC, зазвичай. Зазначено, що дана антена відповідає за визначення загальної ефективності перетворення потужності радіочастоти в постійний струм, а на ефективність перетворення систем РЧ енергії впливають такі фактори як: доступність РЧ-потужності при непередбачуваних інцидентах; втрати для кожного компонента; мінімальна чутливість пов'язаної схеми; обмежена загальна потужність випромінювання; відстань між передавачем і приймачем; висока нелінійна залежність вихідної напруги від вхідної при малих вхідних потужностях; зміна вихідного опору антени через зміну падаючої потужності та частоти, що призводить до втрат на невідповідність; компроміс між пропускнуою здатністю та ефективністю завдяки мініатюризації.

Представлено відомі дослідження та реалізації випрямляючої антени, а також короткий перелік різних типів ректен на сучасному рівні. Подано короткий виклад порівняння досліджень антен. Розглянуто різні типи антен, а саме: дипольна антена, мікросмугова патч-антена, рупорна антена, рамкова антена, спіральна антена.

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 РАДІОЧАСТОТНА СИСТЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ЗБОРУ

Загальна блок-схема радіочастотної системи перетворення потужності збору, показана на рисунку 4.1.

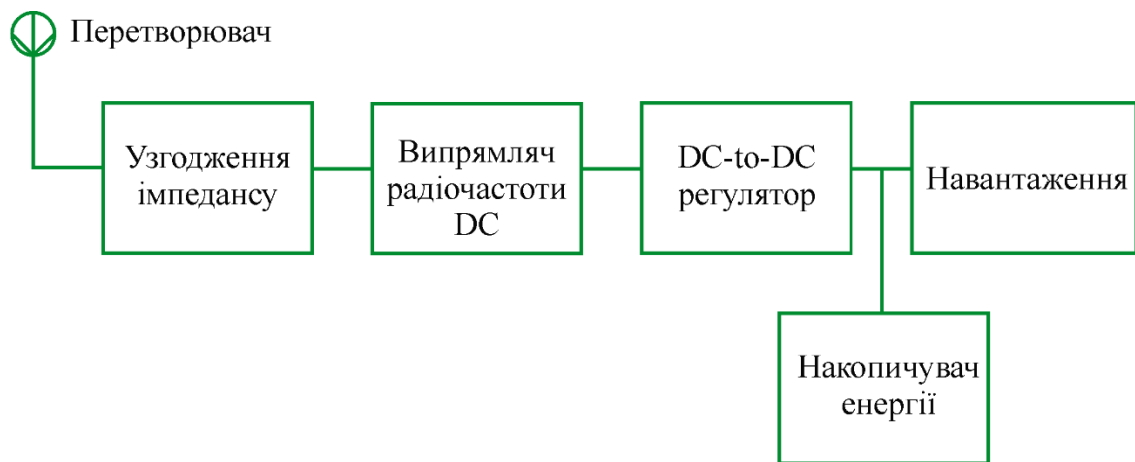


Рисунок 4.1 – Загальна блок-схема системи перетворення радіочастотної потужності

Система, як правило, спрямована на оптимізацію напруги, яка наближається до системи перетворення потужності радіочастоти в постійний струм, щоб стабілізувати вихідну напругу постійного струму на низькому рівні потужності. Схема на рисунку 4.1 містить антену, регулятор напруги, мережу узгодження імпедансу, схему багатокаскадного випрямляча та конденсатор навантаження. Антена відповідає за потужність, що випромінюється радіочастотними хвилями. Максимальна передача потужності забезпечується в системі за допомогою мережі узгодження імпедансу. Радіочастотний сигнал перетворюється на напругу постійного струму за допомогою схеми багатокаскадного випрямляча. Коливання потужності постійного струму, що виникає в результаті випрямлення, усувається схемою стабілізатора напруги. Навантажувальний конденсатор використовується для зберігання постійної

напруги. На рисунку 4.1 показано, що дві каскадні схеми, включаючи механізм випрямлення радіочастоти в постійний струм і метод перетворення DC-to-DC, тобто постійного струму в постійний (регулятор), визначають ефективність системи збору електроенергії. Важливо визначити компонент, який спричиняє втрати у випрямлячі, щоб можна було досягти високоефективного збору радіочастотної енергії; цього також можна досягти шляхом розробки енергоефективного регулятора.

#### 4.1 Мережа узгодження імпедансу

Важливо створити регульовану мережу між приймальною антеною та антенним випрямлячем, щоб відповідати опору між ними, що також може мінімізувати втрати при передачі та збільшити підсилення напруги. На рисунку 4.2 показано еквівалентну схему (заміщення) антени та випрямляча.

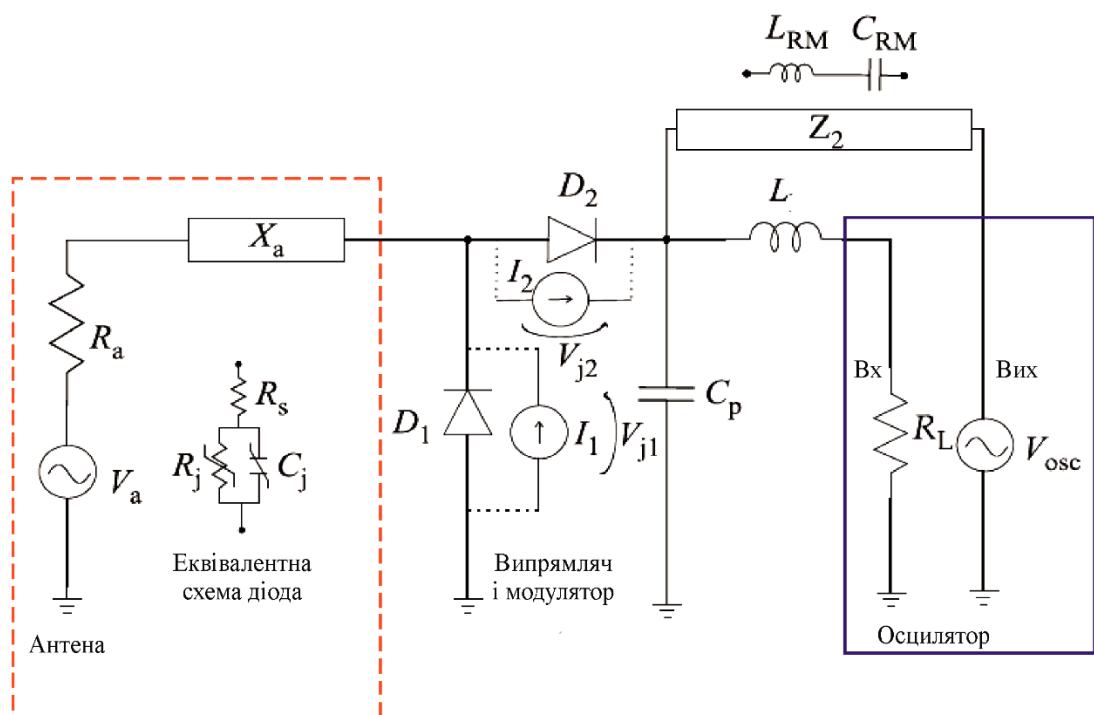


Рисунок 4.2 – Еквівалентна схема для антени та випрямляча

Конденсатори та котушки індуктивності можуть просто створити мережу узгодження імпедансу. Ємнісні ( $C$ ) і резистивні ( $R$ ) компоненти – це елементи, які містяться у вхідному опорі випрямляча  $Z_{ex}$ .

$$Z_{ex} = R \parallel \frac{1}{sC} \quad (4.1)$$

На рисунку 4.2 помітно, що послідовність мереж  $R$  і  $C$  може бути отримана в резонансі шляхом перетворення резистивних і ємнісних компонентів випрямляча.

При резонансі,

$$Z_s = R_s, \quad (4.2)$$

потужність, що розсіюється по антені, еквівалентна потужності, що розсіюється по резистивному компоненту  $R_{sr}$  у випрямлячі.

Кореляції між напругами на  $R_s$  і  $R_{sr}$  описані виразом (4.3):

$$U_{ex} = U_s Q_{sr} \sqrt{\frac{R_{sr}}{R_s}}, \quad (4.3)$$

де  $U_s$  і  $U_{ex}$  – підсилена вхідна напруга і напруга на вході випрямляча відповідно. Таким чином, наявність узгоджувальної мережі може забезпечити пасивне підсилення вхідної напруги до напруги прийому на антені. Зі збільшенням амплітуди напруги, яка надходить на вхід випрямляча, вихідна напруга випрямляча також зростає, а отже, загальна ефективність перетворення потужності системи збільшується.

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4.2 Випрямляюча схема

Випрямляюча схема є одним із найважливіших компонентів системи збору радіочастотної енергії. Схема випрямлення вважається нелінійною, що означає, що кореляційний струм діода та напруга ( $IU$ ) не є лінійними, що вказує на те, що вхідна напруга підвищується лінійно та що вхідна напруга «вмикається», коли необхідна вхідна напруга досягнута. Це можна використовувати для різних застосувань радіочастотних систем, таких як генератори, змішувачі та випрямлячі, а також змішувачі. Можлива нелінійність.

Ідеальний діод діє просто як перемикач (який також є нелінійним), який закритий, коли сигнал змінного струму (АС) має одну полярність, і розімкнений, коли сигнал змінного струму має іншу полярність. Класична нелінійна модель струму на діоді може бути записана у вигляді (4.4):

$$I(U) = I_s (e^{\alpha U} - 1), \quad (4.4)$$

де  $I_s$  – струм насичення ( $10^{-6}$ – $10^{-15}$  А);  $\alpha$  – еквівалент  $q/nkT$ , де  $q$  – заряд електрона ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл),  $n$  – коефіцієнт ідеальності (між 1 і 2),  $k$  – постійна Больцмана ( $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$  Дж/К),  $T$  – температура ( $290$  °С для кімнатної температури);  $U$  – напруга. Таким чином, типове значення  $\alpha$  становить приблизно  $1/(25$  мВ)

Ідеальний графік ВАХ для стандартного діода з використанням рівняння (4.4), а також змодельовані та виміряні криві ВАХ для діода SMS7630 показані на рисунках 4.3 і 4.4. Оскільки експоненціальний елемент у рівнянні (4.4) досить великий, його краще спростити до виразу (4.5), який показує силу струму як нелінійну функцію напруги.

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I(U) = I_s (e^{aU}), \quad (4.5)$$

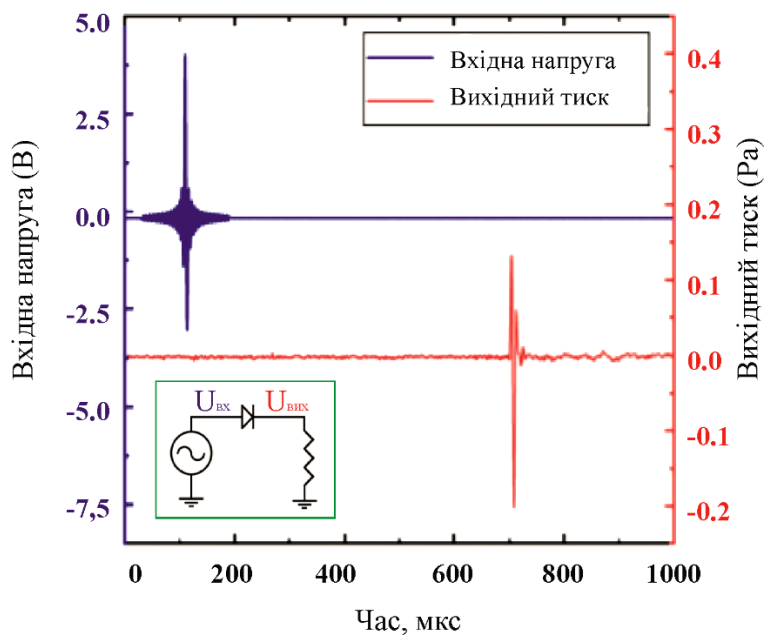


Рисунок 4.3 – Частота та залежна від часу напруга входу та виходу у часовій області

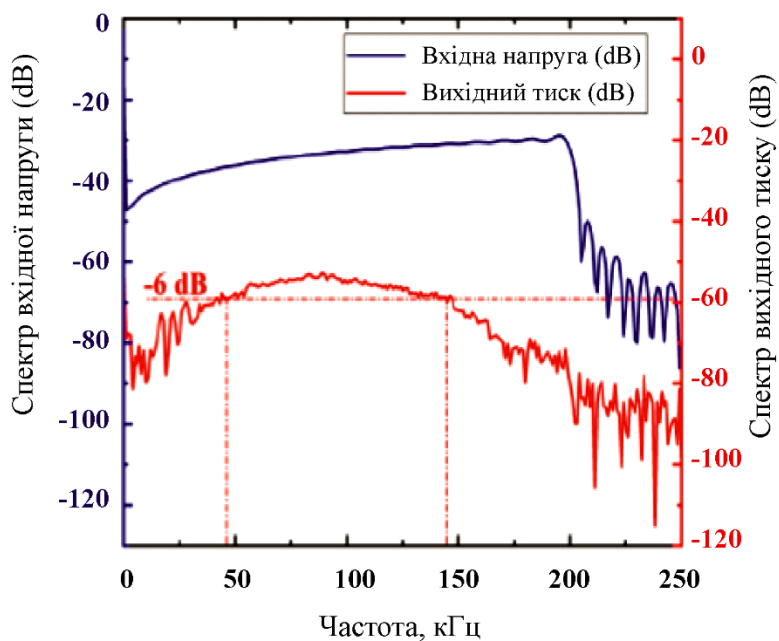


Рисунок 4.4 – Частота та залежна від часу напруга входу та виходу у частотній області

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Нелінійність діода відповідає за створення постійного струму, а також гармонійних компонентів. Це може бути тому, що в рівнянні (4.5) експоненту можна представити як розширення ряду Тейлора у такому вигляді:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3!} + \dots, \quad (4.6)$$

і тому рівняння (4.5) має вигляд:

$$I_{(U)} = I_{(s)} \left( 1 + (\alpha U) + \frac{(\alpha U)^2}{2} + \frac{(\alpha U)^3}{3!} + \dots \right), \quad (4.7)$$

Це показує створення компонента постійного струму поряд з вихідним сигналом і вищими гармоніками. Дивлячись на характеристики діода в частотній області, як показано на рисунку 4.4, демонструє це явище. Спектральна характеристика та часовий діапазон змінного у часі сигналу, який було застосовано до діода, показані на рисунку 4.3. Для всіх симуляцій випрямляча використовувалась система розширеного проектування Keysight (ADS).

Виходячи з цієї цього, випрямлення радіочастотного струму в постійний струм (РЧ-to-DC) можна виразити наступним чином:

$$\eta = \frac{P_{DC, \text{вих}}}{P_{РЧ, \text{вх}}}, \quad (4.8)$$

де  $P_{РЧ, \text{вх}}$  – це кількість потужності на частоті, яка є основною, а  $P_{DC, \text{вих}}$  – це потужність у вихідному сигналі постійного струму

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 4.3 Технології накопичення енергії

Створення системи накопичення енергії може бути одним із найскладніших завдань у сфері збору енергії. У більшості випадків енергія зберігається в звичайних системах зберігання, таких як електричний двошаровий конденсатор і батареї. Кожен з цих варіантів зберігання супроводжується деякими перевагами та обмеженнями. Вугілля використовується як електрод у електричному двошаровому конденсаторі, а заряд зберігається водними або неводними електролітами в електричному полі межі розділу. Зарядження електричного двошарового конденсатора є фізичною, а не хімічною реакцією, і так як він оборотний, що призводить до збільшення годин експлуатації, терміну зберігання, а також це виріб який не потребує обслуговування. Використання електричного двошарового конденсатора для зберігання має наступні переваги:

- необмежений цикл зарядки;
- висока питома ємність;
- тепловий нагрів під час розряду відсутній;
- відсутність ризику перезарядки;
- відсутність ефекту при глибоких розрядах;
- довший термін служби;
- діапазон робочих температур від  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Внутрішній витік пов'язаний із суперконденсаторами через паразитні шляхи, які присутні у зовнішніх схемах, що робить їх непридатними для тривалого зберігання енергії. У порівнянні з суперконденсаторами, батареї є порівняно передовою технологією, яка має більш високу щільність потужності. У програмах збору енергії використовуються різні види акумуляторних батарей, у тому числі нікель-метал-гідридні (NiMH), герметичні свинцево-кислотні (SLA), нікель-кадмієві (NiCd) і літієві (Li) батареї. Серед цих батарей найменш використовуваними є батареї NiCD і SLA через їх тимчасову втрату ємності та порівняно низьку питому енергії (щільність). Проблеми, пов'язані з

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

вищезгаданими батареями, виникають в результаті їх невеликих циклів розряду, також відомого як ефект пам'яті. Є кілька переваг і обмежень, які слід враховувати, роблячи вибір між Li та NiMH акумуляторами; наприклад, термін служби літєвих батарей довший, ніж у NiMH, і їх ефективність також вища, ніж у NiMH. Крім того, швидкість саморозряду в Li нижча, ніж у NiMH батарей. Тим не менш, вони дорожчі, ніж NiMH, навіть якщо врахувати їх подовжений термін експлуатації. Крім того, літій-батарей потребують схеми зарядки, яка є значно складнішою. Незважаючи на те, що батареї не забезпечують високу щільність енергії, відсутність високої щільності потужності робить їх непридатними для певних застосувань, таких як сенсорні мережі, які потребують миттєвої передачі енергії. У той же час суперконденсатори не можуть самостійно використовуватися як накопичувач енергії через їх низьку щільність енергії.

#### 4.4 Висновки до четвертого розділу

У даному розділі розглянуто системи перетворення радіочастотної потужності збору енергії. Система спрямована на оптимізацію напруги, яка наближається до системи перетворення потужності радіочастоти в постійний струм, щоб стабілізувати вихідну напругу постійного струму на низькому рівні потужності.

Зазначено, що важливо створити регульовану мережу між приймальною антеною та антенним випрямлячем, що може мінімізувати втрати при передачі та збільшити підсилення напруги. Відповідно представлено еквівалентну схему антени та випрямляча.

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

Радіочастотні енергетичні сигнали зараз поширені всюди, і вони мають незамінні функції для систем збору радіочастотної енергії. Порівняно з іншими джерелами енергії, такими як теплові перепади, сонячні та механічні коливання, щільність потужності радіочастотної енергії порівняно низькі, але цього достатньо, щоб зарядити деякі датчики або пристрої зібраною енергією.

Антени є однією з важливих частин розробленої системи збору енергії, і продуктивність цих антен, наприклад їх ефективність, посилення та діаграми спрямованості, має вирішальне значення для покращення загальної продуктивності. З цієї причини дуже важливо вибрати відповідні антени на основі їх передбачуваного застосування, наприклад, у радіочастотній ідентифікації, 5G, бездротових сенсорних мережах тощо. Наприклад, для використання датчиків на основі Інтернету речей потрібна низькопрофільна антена з широкою смугою пропускання та високим коефіцієнтом підсилення.

Однак антенні решітки з всенаправленою діаграмою спрямованості призначені для навколишніх систем збору радіочастотної енергії, тому сигнали можна приймати з усіх напрямків, покращуючи ефективність перетворення потужності системи. Крім того, зворотне випромінювання антен має бути дуже низьким, як приклад прикладів переносних пристроїв.

Також у кваліфікаційній роботі представлено огляд збору енергії з поясненнями кількох вимог до моделювання, таких як архітектура перетворювача джерела живлення, додаткова система накопичення (конденсатори або батареї), системи керування, які можуть керувати та корелювати статистику доступності енергії з часом, а також електронні моделі споживання навантаження цільової програми.

					КвРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Григор'єва Л. О. Моделювання режимів роботи консольних п'єзоелектричних збірників енергії [Електронний ресурс] / Л. О. Григор'єва, С. А. Григор'єв // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. - 2022. - Вип. 34. - С. 36-47.
2. Investigation of reconfigurable hardware platforms for 5G protocol stack functions acceleration [Електронний ресурс] / V. A. Melnyk, V. V. Namolia // Applied aspects of information technology. - 2023. - Vol. 6, no. 1. - С. 84–99.
3. Schemmel, D. Wireless energy harvesting system with beamforming capabilities, A. Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, CO, USA, 12 June 2017.
4. Tian, J.; Chen, X.; Wang, Z.L. Environmental energy harvesting based on triboelectric nanogenerators. Nanotechnology 2020, 31, 242001.
5. Song, C. Broadband Rectifying-Antennas for Ambient RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer. Ph.D. Thesis, University of Liverpool, Liverpool, UK, May 2017.
6. Wang, J.; Geng, L.; Ding, L.; Zhu, H.; Yurchenko, D. The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations. Appl. Energy 2020, 267
7. Carneiro, P.; Kholkin, A.; Rodrigues, A.; Ferreira, J.A.; Simões, J.A.; Marques, A.T.; Kholkin, A.L. Electromagnetic energy harvesting using magnetic levitation architectures: A review. Appl. Energy 2020, 260, 114191.
8. Mahfoudi, H.; Tellache, M.; Takhedmit, H. A wideband rectifier array on dual-polarized differential-feed fractal slotted ground antenna for RF energy harvesting. Int. J. RF Microw. Comput. Eng. 2019, 29, e21775.
9. Sun, H.; Geyi, W. A New Rectenna Using Beamwidth-Enhanced Antenna Array for RF Power Harvesting Applications. IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 2016, 16, 1.
10. Divakaran, S.K.; Krishna, D.D. In An Overview of Compact Antennas for RF Energy Harvesting. In Proceedings of the 2017 IEEE International WIE Conference

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), Dehradun, India, 18–19 December 2017; pp. 47–50.

11. Arrawatia, M.; Baghini, M.S.; Kumar, G. Broadband Bent Triangular Omnidirectional Antenna for RF Energy Harvesting. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2015, 15, 1.

12. Shen, S.; Chiu, C.Y.; Murch, R. A Dual-Port Triple-Band L-Probe Microstrip Patch Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, 16, 3071–3074.

13. Khidre, A.; Lee, K.-F.; Elsherbeni, A.; Yang, F. Wide Band Dual-Beam U-Slot Microstrip Antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2013, 61, 1415–1418.

14. Cao, Y.F.; Cheung, S.W.; Yuk, T.I. A Multiband Slot Antenna for GPS/WiMAX/WLAN Systems. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2015, 63, 952–958.

15. Wang, M.; Fan, Y.; Yang, L.; Li, Y.; Feng, J.; Shi, Y. Compact dual-band rectenna for RF energy harvest based on a tree-like antenna. *IET Microw., Antennas Propag.* 2019, 13, 1350–1357

16. Shareef, A.; Goh, W.L.; Narasimalu, S.; Gao, Y. A Rectifier-Less AC–DC Interface Circuit for Ambient Energy Harvesting From Low-Voltage Piezoelectric Transducer Array. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018, 34, 1446–1457.

17. Shi, Y.; Fan, Y.; Li, Y.; Yang, L.; Wang, M. An Efficient Broadband Slotted Rectenna for Wireless Power Transfer at LTE Band. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018, 67, 814–822.

18. Da Silva, E.F.; Neto, A.G.; Peixeiro, C. Fast and Accurate Rectenna Design Method. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2019, 18, 886–890.

19. Choukiker, Y.K.; Behera, S.K. Wideband frequency reconfigurable Koch snowflake fractal antenna. *IET Microw. Antennas Propag.* 2017, 11, 203–208.

20. Yang, L.; Zhou, Y.J.; Zhang, C.; Yang, X.M.; Yang, X.-X.; Tan, C. Compact Multiband Wireless Energy Harvesting Based Battery-Free Body Area Networks Sensor for Mobile Healthcare. *IEEE J. Electromagn. RF Microwaves Med. Boil.* 2018, 2, 109–115.

21. Zhu, L.; Zhang, J.-W.; Han, W.; Xu, L.-J.; Bai, X. A novel RF energy harvesting cube based on air dielectric antenna arrays. *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.* 2019, 29, e21636/

22. Zhang, J.-W.; Bai, X.; Han, W.-Y.; Zhao, B.-H.; Xu, L.-J.; Wei, J.-J. The design of radio frequency energy harvesting and radio frequency-based wireless power transfer system for battery-less self-sustaining applications. *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.* 2018, 29, e21658

23. Dhar, S.; Ghatak, R.; Gupta, B.; Poddar, D.R. A Wideband Minkowski Fractal Dielectric Resonator Antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2013, 61, 2895–2903.

24. Розвадовський А.Ф. Забезпечення ефективного використання енергії електромагнітного поля ліній електроживлення у короткохвильовому діапазоні : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.05. – К., 2009. – 20 с.

25. Коваль М. О. Моделі та методи самоорганізації сенсорних мереж для забезпечення їх зв'язності в умовах заводої обстановки: автореф. дис. ... д.філософ : 122 - Комп'ютерні науки. — 2021

26. Базилевич В. Аналіз методів захисту від кіберзагроз в бездротових мережах стандарту IEEE 802.11 // *Захист інформації.* - 2017. - 19, № 3.

27. Козелков С. В. Перспективи, переваги та основні принципи волоконно-ефірних технологій для телекомунікаційних систем в міліметровому діапазоні хвиль // *Системи упр., навігації та зв'язку.* - 2019. - Вип. 3

28. Антонова Г. В. Бездротові технології як ланка цифровізації сільського господарства // *Комп'ютер. засоби, мережі та системи : зб. наук. пр.* - 2018. - № 17.

29. Системи акумулювання і перетворення енергії відновлювальних джерел: дис... д-ра техн. наук: 05.14.08 / Кудря Степан Олександрович ; НАН України, Інститут електродинаміки. - К., 1996. – 549.

30. Підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.05 / Трінчук Данило Ярославович ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". - Київ, 2019. - 20 с.

					КВРТР.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

31. Okba, A.; Takacs, A.; Aubert, H. Compact Rectennas for Ultra-Low-Power Wireless Transmission Applications. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2019, 67, 1697–1707.

32. Palazzi, V.; Hester, J.G.D.; Bito, J.; Alimenti, F.; Kalialakis, C.; Collado, A.; Mezzanotte, P.; Georgiadis, A.; Roselli, L.; Tentzeris, M.M. A Novel Ultra-Lightweight Multiband Rectenna on Paper for RF Energy Harvesting in the Next Generation LTE Bands. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2018, 66, 366–379.

33. Cambero, E.V.V.; Da Paz, H.P.; Da Silva, V.S.; De Araujo, H.X.; Casella, I.R.S.; Capovilla, C.E. A 2.4 GHz Rectenna Based on a Solar Cell Antenna Array. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2019, 18, 2716–2720.

34. Almohaimeed, A.M.; Amaya, R.E.; Lima, J.A.; Yagoub, M.C. An Adaptive Power Harvester with Active Load Modulation for Highly Efficient Short/Long Range RF WPT Applications. *Electronics* 2018, 7, 125.

35. Chen, Y.-S.; You, J.-W. A Scalable and Multidirectional Rectenna System for RF Energy Harvesting. *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.* 2018, 8, 2060–2072.

36. Bakogianni, S.; Koulouridis, S. A Dual-Band Implantable Rectenna for Wireless Data and Power Support at Sub-GHz Region. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019, 67, 6800–6810.

37. Guardiola, M.; Monsalve, B.; Calafell, I.; Roqueta, G.; Romeu, J. Fabrication and measurement of homemade standard antennas. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2012, 54, 177–194.

38. Piske, R.S.; Rathod, D.; Gothe, Y. Design and analysis of h plane horn antenna at x band frequency. *Int. J. Urban Reg. Res. Develop.* 2015, 3, 2321–2613.

39. Rahman, N.; Hassan, S.A.; Samsuzzaman; Singh, M.S.J.; Islam, M.T. Determination of salinity and sugar concentration using microwave sensor. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2018, 61, 361–364.

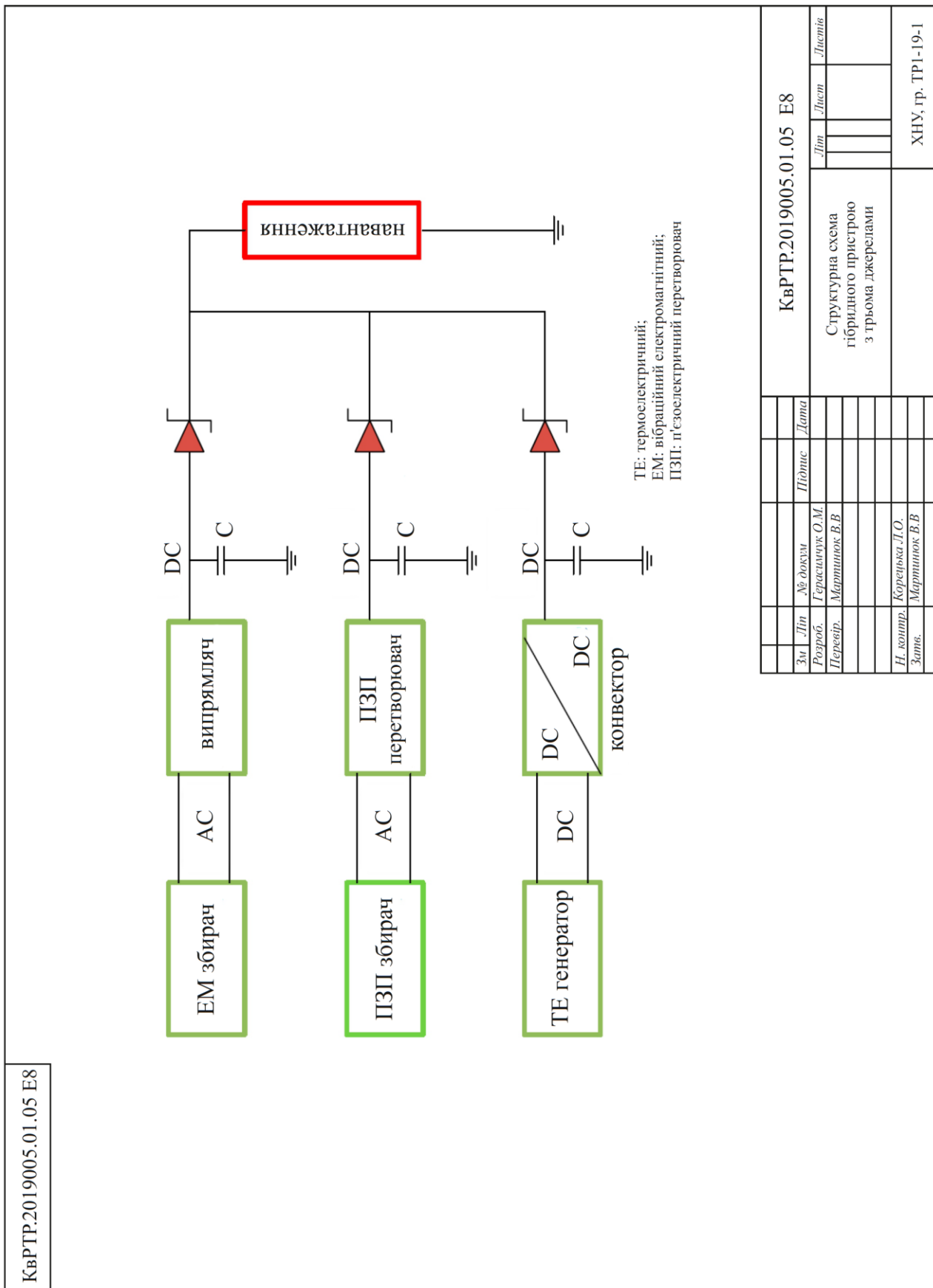
40. Abed, A.T.; Singh, M.S.J.; Jawad, A.M. Investigation of circular polarization technique in Q-slot antenna. *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* 2019, 12, 176–182.

					КВРTP.2019005.01.05 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

## ДОДАТКИ

## Додаток А

### Структурна схема гібридного пристрою з трьома джерелами

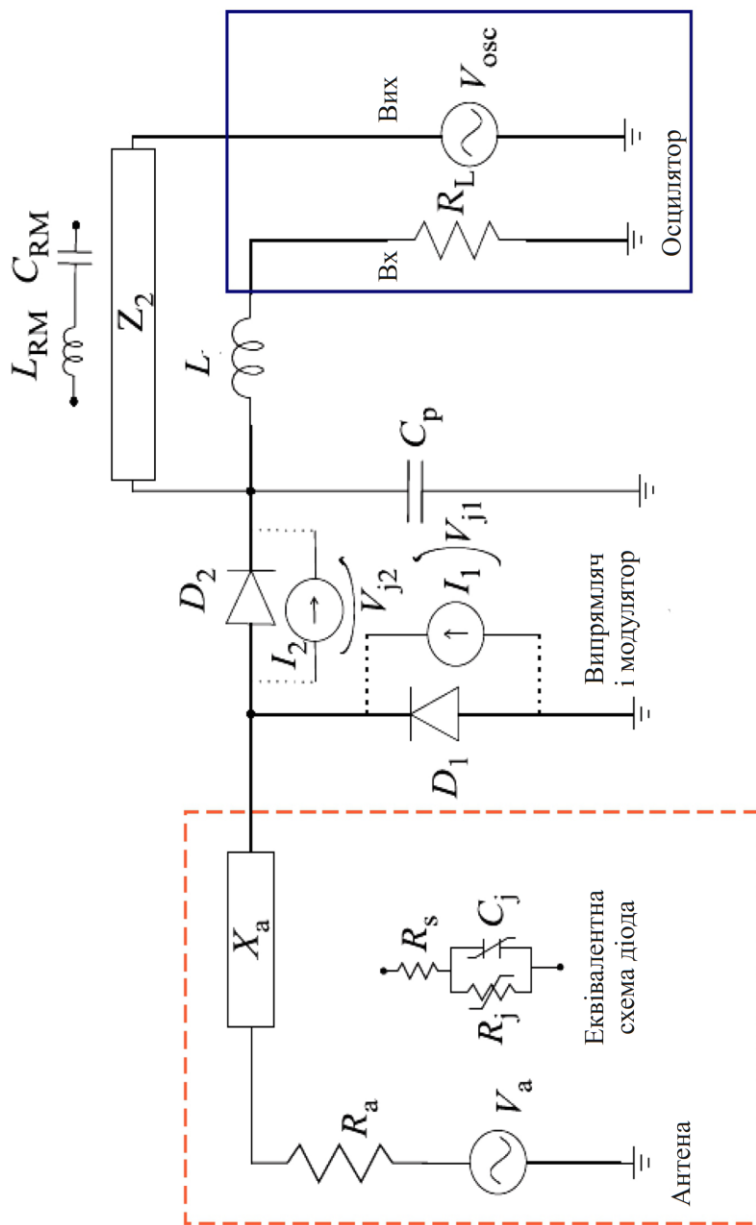




## Додаток В

### Еквівалентна схема для антени та випрямляча

КвРТР.2019005.01.05 Е8



КвРТР.2019005.01.05 Е8			
Зм.	Ліп	№ докум	Підпис
Розроб.	Герасимчук О.М.		Дата
Перевір.	Мартинович В.В.		
Н. колір.	Корсирька Л.О.		
Затв.	Мартинович В.В.		
Еквівалентна схема для антени та випрямляча			
ХНУ, гр. ТР1-19-1			

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:  
1015575494

Дата перевірки:  
13.06.2023 00:02:28 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
13.06.2023 00:45:49 EEST

ID користувача:  
100005862

Назва документа: Герасимчук

Кількість сторінок: 59 Кількість слів: 10443 Кількість символів: 80732 Розмір файлу: 2.03 MB ID файлу: 1015225950

121 слово позначене як "вилучене" та не враховується у підрахунку слів

## 7.2% Схожість

Найбільша схожість: 5.15% з Інтернет-джерелом (<https://www.inforum.in.ua/conferences/24/78/575>)

7.11% Джерела з Інтернету 24 ..... Сторінка 61

0.09% Джерела з Бібліотеки 3 ..... Сторінка 61

## 0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

Не знайдено жодних посилань

## 0.01% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

Немає вилучених Інтернет-джерел

0.01% Вилученого тексту з Бібліотеки 2 ..... Сторінка 61

## Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 19

Tue Jun 13 02:37:12 EEST 2023, Фецула Микола Васильович, Хмельницький національний університет, ХНУ

## Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилоч в документах: 9%**

ID: 115814 Назва: БКР Дослідження методів збору енергії для розробки пристроїв з автономним живленням Додано в БД: 2023-06-13 Автора: Олег ГЕРАСИМЧУК Керівники: Валерій МАРТИНЮК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	64713	1008	574 (1%)	8 (1%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

МІНІСТЕРСТВО ОВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Герасимчук Олег Миколайович

Тема роботи: Дослідження методів збору енергії для розробки пристроїв з автономним живленням

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 61

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Метою кваліфікаційної роботи є перетворення енергії з однієї форми в іншу, для живлення електронних пристроїв. Дослідження нових джерел енергії з найвищою ефективністю, які є похідними від існуючих джерел енергії, є важливою областю досліджень і викликає великий інтерес. Збір радіочастотної (РЧ) енергії є багатообіцяючою альтернативою для отримання енергії для бездротових пристроїв безпосередньо з джерел радіочастотної енергії в навколишньому середовищі. Огляд концепції збору енергії буде детально розглянуто в цій кваліфікаційній роботі.

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 відповідності до технічного завдання у даній кваліфікаційній роботі подано огляд процедур розробки енергозбору. Крім того, надається порівняння між методами збору енергії на основі різних джерел енергії та параметрів. Тим не менш, кілька типів антен, які можуть бути використані в комплексних системах збору енергії, розглядаються перед порівнянням з точки зору їх розміру, коефіцієнта підсилення, ефективності тощо. Сучасний погляд на схеми для збирання енергії базується на принципах кондиціонування живлення, які також включають перетворення змінного струму в постійний і регулювання напруги. У сфері перетворення енергії схеми збору енергії часто накладають електричні межі для пристроїв, які важливі для максимізації енергії, що збирається. Ефективність перетворення потужності описується як співвідношення між вихідною потужністю постійного струму випрямляча та вхідною потужністю радіочастоти антени (перед її проходженням через відповідну мережу).

4. Позитивні сторони роботи: Результати виконаної роботи показали, що необхідно проводити подальші дослідження в даному напрямку та рухатися шляхом удосконалення нових джерел енергії з найвищою ефективністю. Напрямок досить перспективний і попит на дані компоненти з кожним днем тільки зростатиме.

5. Негативні сторони роботи: У роботі бажано було б більш детально розглянути методи збору енергії. Присутні невеликі граматичні помилки. Однак, ці недоліки не мають принципового значення, суттєво не впливають на кінцевий результат і не знижують загального враження від проведеної роботи.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

7. Відгук про роботу в цілому: В цілому кваліфікаційно робота виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (3.25/D), а її автору Гурасимчуку О.М., присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Мішан Віктор Володимирович –к.т.н., доцент кафедри ТМІТ

«13» червня 2023р.

  
підпис

Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Герасимчук О.М.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи ТР1-19-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

09.06.2023

дата



підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
РОБОТОТЕХНІКИ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Дослідження методів збору енергії для розробки пристроїв з автономним живленням

Автор: Герасимчук Олег Миколайович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

Науковий керівник: д.т.н., професор Мартинюк В.В.

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<b>Відповідає</b>
2	Виявлені запозичення не є 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. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 7,2% і адресується до 27 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

14.06.23  
Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Денис МАКАРИШКІН

Валерій МАРТИНЮК