

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Бакалавр

Освітній рівень

Система бездротової передачі енергії

Назва теми

КПТР.2021025.02.05 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі»

Назва

Виконав:

здобувач 3 курсу, група ТР2с-21-1


підпис

Олександр ГОРЧИЦЯ

Ініціали, прізвище

Керівник: д-р техн. наук, професор


підпис

Юлій БОЙКО

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

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


підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

"07" 2024 .

Хмельницький, 2024

Хмельницький національний університет

Факультет	інформаційних технологій
Кафедра	телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій
Освітній рівень:	бакалавр
Галузь знань:	17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність:	172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма:	Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ТМІТ

 Сергій ПІДЧЕНКО

«15» 02 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ**

ГОРЧИЦЯ Олександр Вадимович

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

1 Тема роботи: Система бездротової передачі енергії

Керівник роботи: БОЙКО Юлій Миколайович, д-р техн. наук, професор

Затверджено наказом по університету від «15» лютого 2024р. № 8

2 Строк подання здобувачем роботи на кафедрі 03 червня 2024 року

3 Вихідні дані до роботи: система бездротової передачі енергії, технічне завдання

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

- Огляд систем бездротової передачі енергії.
- Технічні аспекти систем бездротової передачі енергії.
- Аналіз та оптимізація систем вторинних випрямлячів у контексті бездротової передачі енергії.
- Експериментальне дослідження та порівняння роботи вторинних випрямлячів у системах бездротової передачі енергії

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

- Блок-схема досліджуваної установки системи. Принципові схеми імітаційної моделі системи бездротової передачі енергії. Часові характеристики змінних для мостового діодного випрямляча.

6 Консультанти розділів кваліфікаційного проекту

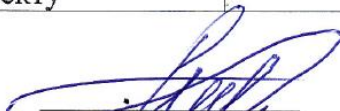
Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7 Дата видачі завдання 01 лютого 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційний проект	01.02.2024р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційний проект	15.02.2024р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.03.2024р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2024р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2024р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2024р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційного проекту	10.05.2024р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційного проекту	15.05.2024р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційного проекту	20.05.2024р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційного проекту	28.05.2024р.	виконано

Здобувач


(підпис, дата)

Олександр ГОРЧИЦЯ

Науковий керівник


(підпис, дата)

Юлій БОЙКО

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проекту: «Система бездротової передачі енергії»

Автор проекту: ГОРЧИЦЯ Олександр Вадимович

Керівник проекту: БОЙКО Юлій Миколайович, д-р техн. наук, професор.

Пояснювальна записка: 70 сторінок, 24 рисунки, 7 таблиць, 45 джерел.

Графічна частина: 4 креслення, 17 презентаційних слайдів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БЕЗДРОВОТА ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ, ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ, ВТОРИННА ОБМОТКА, ДІОДНИЙ ВИПРЯМЛЯЧ, ПОДВІЙНЕ СТРУМОВЕ ПОДВОЄННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ, СИСТЕМА БЕЗДРОВОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

Об'єктом дослідження є система бездротової передачі енергії.

Мета кваліфікаційного проекту полягає в розробці та вдосконаленні системи бездротової передачі енергії через впровадження альтернативної конфігурації випрямляча вторинної обмотки для досягнення високої ефективності роботи системи при номінальній потужності.

Кваліфікаційний проект присвячений оптимізації системи бездротової передачі енергії через новаторську конфігурацію випрямляча вторинної обмотки, зокрема діодного випрямляча із подвійним струмовим подвоєнням. Проведено аналіз електричної поведінки та визначено оптимальні умови ефективності при номінальній потужності. Розроблено відповідні котушки індуктивності та порівняно запропоноване рішення з альтернативами вторинного випрямлення. Здійснено аналіз чутливості до навантаження, виявивши перспективність запропонованого підходу для високоефективної роботи системи бездротової передачі електроенергії.

03.06.2024 р.



ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ	10
1.1 Визначення ключових технологічних відкриттів та досягнень	10
1.2 Тесла та його експерименти з бездротовою передачею енергії	11
1.3 Технології ближнього поля та безвипромінювальні технології.....	12
1.4 Мікрохвилі та лазери	13
1.5 Системи бездротової передачі електроенергії	14
1.6 Висновок до першого розділу	16
2 ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ.....	17
2.1 Класифікація систем відповідно до принципів передачі	21
2.1.1 Огляд системи з електромагнітним зв'язком	21
2.1.2 Джерело живлення	22
2.1.3 Схема передавача	23
2.1.4 Компенсаційна мережа та антена	24
2.1.5 Схема приймача.....	24
2.2 Індуктивний зв'язок.....	25
2.3 Магнітно-резонансний зв'язок	28
2.4 Електродинамічний зв'язок	29
2.5 Ємнісний зв'язок.....	30
2.6 Порівняльний аналіз індуктивного зв'язку та ємнісного зв'язку	31
2.7 Висновок до другого розділу	36
3 АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ ВТОРИННИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ У КОНТЕКСТІ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ.....	37

					КПТР.2021025.02.05			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Система бездротової передачі енергії Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Горчиця О.В.						
Перевір.		Бойко Ю.М.					2	70
Реценз.						ХНУ, гр. ТР2с-21-1		
Н. Контр.		Стецюк В.І.						
Затверд.		Підченко С.К.						

3.1	Методи оптимізації ефективності системи бездротової передачі електроенергії	37
3.2	Принципи роботи випрямляча струму в системі бездротової передачі енергії	40
3.3	Аналітичний підхід до оптимального проектування індукторів подвоєння струму	42
3.4	Висновок до третього розділу	51
4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ РОБОТИ ВТОРИННИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ У СИСТЕМАХ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ	52
4.1	Порівняння ефективності системи бездротової передачі енергії для мостового діодного випрямляча та запропонованої модифікованої схеми	53
4.2	Проведення експериментальної перевірки та аналіз результатів	57
4.3	Висновок до четвертого розділу	65
	ВИСНОВКИ	66
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

BLE	–	Bluetooth Low Energy
DC	–	direct current
EM	–	electromagnetic
EMC	–	electromagnetic compatibility
FSK	–	frequency-shift keying
HF	–	high frequency
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPT	–	inductive power transfer
LPT	–	laser power transfer
MRC	–	magnetic resonance coupling
P-P		parallel-parallel
RF	–	radio frequency
RFEH	–	radio frequency energy harvesting
RFPT	–	radio frequency power transfer
SAR	–	specific energy absorption rate
SMPS	–	switched-mode power supply
S-S		series-series
WPC	–	Wireless Power Consortium
WPT	–	wireless power transfer
БЖ	–	Блок живлення
ЕМП	–	Електромагнітне поле
ЕРС	–	Електрорушійна сила
ККД	–	Коефіцієнт корисної ді

					КІТТ.2021025.02.05	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Бездротова передача електроенергії визнана однією з найбільш перспективних технологічних концепцій. Цей інноваційний підхід вже успішно впроваджується в промислових індуктивних системах знімання на виробничих підприємствах [1]. Крім того, бездротова передача електроенергії активно використовується в портативній побутовій електроніці і знаходить застосування в біомедичних дослідженнях [2,3,4,5,6], забезпечуючи безперервне живлення пристроїв та медичних імплантатів. Ці технологічні досягнення свідчать про активний розвиток бездротових систем передачі електроенергії та демонструють їхню здатність використовуватися в різних галузях, що підтверджує їхню важливість у сучасному технологічному середовищі.

Активні наукові дослідження в останні часи фокусуються на аспектах статичної та динамічної зарядки електромобілів [7,8] та розробці бездротових зарядних систем для медичних імплантатів [9,10]. Збільшення постійної потужності бездротових зарядних пристроїв для портативних пристроїв висуває серйозні виклики перед інженерами-електриками та дослідниками, особливо в контексті ефективного відведення теплових втрат поза межі заряджених акумуляторів. З огляду на те, що портативні пристрої мають низьке значення зарядної напруги і високе значення струму, виникають значні втрати тепла, особливо при урахуванні значення послідовного опору паразитної вторинної котушки [11]. Ці виклики є ключовими у вдосконаленні систем бездротової зарядки та визначають напрямки подальших наукових розвідок у даній області.

Необхідно оптимізувати опір навантаження у бездротовій системі передачі електроенергії, перетворюючи його на оптимальний для системи, оскільки ефективність передачі великою мірою залежить від цього параметра. Це дозволяє досягти високої ефективності передачі потужності в усьому (або

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значному) діапазоні навантаження. Ряд досліджень був проведений у цьому напрямку [12,13,14,15]. Загалом, існує принаймні чотири широко використовувані методи, які можуть бути застосовані для оптимізації опору навантаження, і вони є об'єктом інтенсивного вивчення та досліджень у науковому середовищі:

- використання DC-DC перетворювачів для зміни опору навантаження;
- використання пасивних схем для узгодження імпедансу;
- реконфігуровані резонансні схеми для узгодження імпедансу;
- використання змінної робочої частоти.

Виявлення та вдосконалення цих методів становлять важливий крок у розвитку бездротових систем передачі енергії та покращенні їхньої продуктивності в різних умовах експлуатації.

Ключовим аспектом буде характеристика конкретної топології компенсації, використаної в аналізованій системі бездротової передачі енергії. Наприклад, топології, такі як послідовно-послідовна (S-S – series-series, яка компенсує власну індуктивність котушок), паралельно-паралельна (P-P – parallel-parallel), гібридні топології LCC-LCC, LCC-P та інші, характеризуються своїм струмовим виходом, функціонуючи як джерела струму. Інші топології, такі як S-S (з компенсацією блукаючої індуктивності котушок), P-S, S-P, LCC-S та інші, діють як джерела напруги. Вивчення та розуміння характеристик цих топологій є важливим етапом для ефективно оптимізації бездротових систем передачі енергії в залежності від конкретних вимог та умов застосування.

Для певного типу виходу найбільш доцільно використовувати виключно сумісний подвоювач струму. У загальному розумінні існують два види подвійників струму: ті, що використовують випрямлячі з котушками без магнітного зв'язку (застосовні для бездротових систем передачі електроенергії з

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вихідним струмом) та ті, що використовують випрямлячі з котушками з магнітним зв'язком (придатні для бездротових систем передачі електроенергії з вихідною напругою) [16]. Розпізнання і вибір конкретного типу подвоювача струму залежить від характеристик конкретної системи та вимог до її функціональності.

Електромобілі, які використовують технологію бездротової передачі енергії, зазвичай розглядають свої батареї як джерело енергії. Рівень вихідної потужності повної системи бездротової передачі енергії залежить від взаємної індуктивності та еквівалентного опору батареї. У випадку використання мостового випрямляча, потужність, що передається на вторинну сторону бездротової системи передачі енергії, може бути недостатньою при невеликому навантаженні. Для підвищення загальної потужності системи передачі електроенергії використовуються різні стратегії і підходи.

Для максимізації передачі потужності запропоновано [17] новий метод передачі імпедансу, який використовує комбінований режим безперервної провідності і режим переривчастої провідності та функціонує на понижувальному перетворювачі. Проте для приймаючої сторони потрібен понижувальний перетворювач, що може збільшити вартість і площу встановлення системи. Також необхідні перемикач і три пасивні елементи. Для підвищення рівня потужності різницю фаз між вхідною напругою вторинного випрямляча та вихідною напругою первинного інвертора можна встановити на 90 градусів за допомогою додаткової системи з трьома котушками [18].

Проте, для здійснення замкнутого циклу управління необхідна бездротова взаємодія між передавачем та приймачем. На жаль, додаткові засоби комунікації можуть призвести до збільшення розмірів системи та витрат. Кілька досліджень [19,20,21] впроваджували корекцію частоти для відстеження максимальної потужності, коли коефіцієнт зв'язку виходить за межі критичного стану зв'язку.

					КІТР.2021025.02.05	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проте це, в основному, відноситься до проблеми втрат вихідної потужності при різних значеннях коефіцієнта зв'язку.

Важливо відзначити, що стратегія модифікації частоти не може вирішити проблему зниження вихідної потужності, що виникає внаслідок впливу навантаження. Однак для досягнення оптимальної ефективності передачі енергії для конкретної системи бездротової передачі існує оптимізоване значення опору навантаження, позначене як R_{opt} [22]. Недавні дослідження вдосконалення відстеження максимальної ефективності при коливанні навантаження надають огляд цього підходу. Для досягнення оптимального відстеження ефективності, змінний опір навантаження R передається в оптимальний опір R_{opt} за допомогою пристрою постійного струму в постійний струм, який розташований на вторинній стороні. Треба відзначити, що цей підхід супроводжується додатковими втратами потужності від DC/DC перетворювача, зростанням вартості компонентів та збільшенням розмірів, що може становити певні труднощі.

Для досягнення узгодження імпедансу використовується пасивна мережа, яка включає котушки індуктивності та конденсатор, і розташована перед компонентом випрямляча. Однак цей підхід вносить небажаний уявний опір. Шляхом зміни кута фазового зсуву активного випрямляча можна налаштувати еквівалентний імпеданс на оптимальне значення для досягнення максимальної ефективності. Проте це ускладнює контроль, оскільки точне визначення перетину нульової точки є необхідним для точного налаштування.

У даному дослідженні основна увага приділяється аналізу продуктивності конкретної системи безпроводної передачі енергії (БПТ) із мережею послідовної компенсації використовуючи альтернативну топологію випрямляча на вторинній стороні. Оцінка ефективності всієї системи проводиться через аналіз коефіцієнта імпедансу. Зокрема, досліджується можливість заміни стандартного

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

двостороннього діодного (або синхронного) випрямляча у мостовому з'єднанні. Використання модифікованого випрямляча на вторинній стороні, який відрізняється вищим перетворенням імпедансу, створює умови для досягнення вищої ефективності, як це передбачено оптимізаційною процедурою. Дана робота детально розглядає цей підхід в контексті системи безпроводної передачі енергії, вивчаючи його можливості та переваги.

Такий підхід виявляється сприятливим для систем із низьким еквівалентним навантаженням, уникнувши необхідності розглядати використання додаткового перетворювача потужності на вторинній стороні. Впровадження запропонованої топології випрямляча призводить до підвищення напруги на вході випрямляча, що знижує струм через вторинну котушку. Запропоноване рішення піддавалося аналізу для визначення оптимального значення індуктивності з метою досягнення максимально можливої ефективності роботи. У заключній частині проведено змодельовану перевірку, а отримані результати розглядаються в контексті загальної конфігурації бездротової системи передачі електроенергії.

					КІТР.2021025.02.05	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

1.1 Визначення ключових технологічних відкриттів та досягнень

У XIX столітті виникло багато теорій та контртеорій щодо можливості передачі електричної енергії. У 1826 році Андре-Марі Ампер встановив зв'язок між струмом та магнітами. Тоді, в 1831 році, Майкл Фарадей описав свій закон індукції, що пояснює явище виникнення струму в провідниковій петлі при змінюваному магнітному потоці. Незвідану можливість передачі електричної енергії без проводів помічали багато винахідників та експериментаторів, але відсутність системної теорії робила їхні спостереження неоднозначними, особливо щодо електромагнітної індукції.

Розпочавши в 1860-х роках, рівняння Максвелла від Ямеса Клерка Максвелла уніфікували концепції електрики та магнетизму у загальний фреймворк електромагнетизму. Вони передбачили існування електромагнітних хвиль як "бездротових" носіїв електромагнітної енергії. У 1884 році Джон Генрі Пойнтінг введе вектор Пойнтінга та сформулює теорему Пойнтінга, що описує потік потужності в електромагнітному випромінюванні, надаючи засади для аналізу бездротових систем передачі енергії.

У той же період Вільям Генрі Уорд та Махлон Луміс в 1871-1872 роках пропонували схеми бездротової передачі сигналів, ґрунтуючись на ідеї наелектризованого шару атмосфери. Однак ці концепції були помилковими, оскільки вони базувались на ідеї наелектризованого шару, який фактично не існує на низькій висоті. Невдовзі після цього, в 1888 році, Генріх Рудольф Герц експериментально підтвердив існування радіохвиль, підкріпивши теоретичні концепції Максвелла.

					КІТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Практичні експерименти із бездротовою передачею енергії вже відбувалися. Наприклад, в 1879 році Амос Дольбер використовував земну провідність для передачі сигналів на відстань у чверть милі за допомогою магнето-електричного телефону.

Таким чином, ХІХ століття відзначилося не лише розвитком теоретичних концепцій, але й практичними експериментами щодо бездротової передачі енергії.

1.2 Тесла та його експерименти з бездротовою передачею енергії

Після 1890 року винахідник Нікола Тесла експериментував із передачею потужності за допомогою індуктивного та ємнісного зв'язку за допомогою радіочастотних резонансних трансформаторів із іскровим збудженням, які тепер називають котушками Тесла, які генерували високу напругу змінного струму. Він використав відкриття Майкла Фарадея про електромагнітну індукцію, за якою дріт, що має електричний струм, може індукційно передавати струм сусіднім провідникам [23]. Засновуючись на теоретичних основах Тесли та досягненнях у високоефективних енергетичних електронних компонентах (таких як пристрої з кремнію, карбїду кремнію та нітриду галію), бездротова передача енергії через ближнє поле стала реальністю. Тесла продемонстрував, що бездротова передача енергії може бути більш ефективною, якщо котушки, що передають електроенергію, перебувають у резонансі. Для досягнення резонансу необхідно збільшити частоту роботи, для чого використовують високочастотні імпульсні перетворювачі потужності та провідні дроти з низьким опором змінного струму, наприклад, дроти Litz [24].

Ці відкриття сприяли розвитку медичних імплантатів із бездротовою зарядкою наприкінці 1980-х років, а також індуктивних систем прийому енергії та зарядки електромобілів (Електромобілів) у 1990-х роках. З моменту винаходу

					КІТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

мобільних телефонів у 1990-х роках дослідники активно шукали способи їх бездротової зарядки. Технологія бездротової передачі енергії дозволяє уникнути громіздких дротів, поліпшуючи не лише зручність користувачів, але й сприяючи екологічному благополуччю.

1.3 Технології ближнього поля та безвипромінювальні технології

Індуктивна передача енергії, що використовує дротяні котушки, належить до перших форм бездротового живлення існуючих вже з епохи розробки трансформатора в 1800-х роках. З появою бездротових пристроїв, які використовуються в умовах вологого середовища, таких як електричні зубні щітки та електричні бритви, були створені підставки для індуктивного заряджання, щоб уникнути ризику ураження електричним струмом.

Вперше індуктивна передача енергії використовувалася для живлення електричних локомотивів у 1892 році. Моріс Хутін і Моріс Леблан запатентували метод бездротового живлення для залізничних поїздів, використовуючи резонансні котушки, з'єднані індуктивно, що працювали на частоті 3 кГц.

У 1960-х роках резонансну індуктивну передачу енергії успішно використовували в імплантованих медичних пристроях, таких як кардіостимулятори та штучне серце. Резонансні котушки були вперше використані як у приймачі, так і в передавачі, щоб забезпечити високу ефективність та пристосованість до рухомих умов.

Крім того, в ранніх 1970-х роках Маріо Кардулло та інші винахідники створили пасивні технології RFID, які згодом використовувалися в безконтактних смарт-картах.

Зростання популярності портативних бездротових пристроїв, таких як мобільні телефони та планшети, призвело до розвитку технологій бездротового живлення і заряджання середнього діапазону. Наприклад, консорціум Wireless

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Power, заснований у 2008 році, розробив стандарт індуктивної потужності Qi, який дозволяє ефективно заряджати портативні пристрої на відстані до 4 см.

У 2007 і 2008 роках були проведені дослідження, де використовувалися резонансні індуктивні системи для передачі енергії на відстань до 12 метрів. Такі технології мають потенціал для подальшого розвитку в сучасних системах бездротового заряджання.

1.4 Мікрохвилі та лазери

До початку Другої світової війни було досягнуто обмежений прогрес у сфері бездротової передачі електроенергії. Хоча радіо було успішно винайдено для забезпечення зв'язку, його низькочастотні хвилі не могли ефективно передавати електроенергію, оскільки розсіювалися в усіх напрямках, не забезпечуючи достатньої енергії для приймачів. У радіозв'язку використовувався підсилювач для посилення слабкого сигналу за рахунок енергії з іншого джерела. Однак для ефективної передачі електроенергії потрібні були передавачі, здатні генерувати високочастотні мікрохвилі і фокусувати їх на приймачі.

Під час Другої світової війни розвиток мікрохвильової технології, таких як клістри, магнетронні трубки та параболічні антени, зробив випромінювальні методи ефективними. В 1960-ті роки Вільям К. Браун вперше досягнув бездротової передачі енергії на великі відстані. У 1964 році він винайшов ректену, здатну ефективно перетворювати мікрохвилі в постійний струм, і продемонстрував це, запускаючи перший бездротовий літальний апарат - модель вертольота, живлену мікрохвилями. Значний інтерес до мікрохвильових досліджень у 1970-х і 1980-х роках був пов'язаний з розробкою супутника сонячної енергії.

Важливим кроком була реалізація експериментів, проведених Брауном у 1975 році, де він успішно передавав 475 Вт мікрохвильової потужності на

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

відстань милі з ефективністю перетворення 54%. У 1983 році в Лабораторії реактивного руху НАСА він та Роберт Дікінсон передали 30 кВт постійного струму на відстань 1,5 км за допомогою мікрохвиль 2,38 ГГц від 26-метрової тарілки до масиву ректену. Ефективність перетворення становила 80%.

За останні роки дослідження зосереджені на розробці бездротових безпілотних літальних апаратів. Зокрема, у 2003 році був здійснений політ першого літака з лазерним двигуном, який живився від електроенергії, згенерованої фотоелементами від інфрачервоного світла наземного лазера, тоді як система керування тримала лазер спрямованим на літак.

1.5 Системи бездротової передачі електроенергії

Системи бездротової передачі електроенергії – це комплексні технологічні системи, які дозволяють передавати електричну енергію від джерела до споживача без використання фізичних проводів. Ці системи використовують принципи електромагнітної індукції та резонансу для безпроводного передавання енергії на відстані, що може бути корисним у різноманітних сферах, таких як зарядка портативних пристроїв, електричних транспортних засобів, медичних імплантатів тощо. Такі системи використовують передавачі та приймачі, обладнані відповідними котушками і електронікою для оптимального безпроводного передавання електроенергії.

За допомогою технології бездротової передачі енергії можна покращити зручність і частоту зарядки, що дозволяє зменшити ємність системи зберігання енергії та зменшити розмір, вагу і вартість пристрою. Також передавачі легко інтегруються в різноманітні об'єкти, такі як меблі, автомобілі, комп'ютерні монітори тощо.

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

У таблиці 1.1 наведено хронологію розвитку технології бездротової передачі енергії. У цьому переліку представлені важливі моменти і винаходи, що визначали шлях розвитку безпроводної зарядки протягом років. Таблиця 1.1 висвітлює ключові події і досягнення, що відзначаються у виникненні і вдосконаленні технології передачі електроенергії без використання проводів.

1.6 Висновок до першого розділу

У підсумку оглядово-історичного розділу можна визначити, що бездротова передача електроенергії є результатом довгого еволюційного процесу, який охоплює ряд відкриттів та технологічних розвитків. З перших досліджень індукційної передачі в XIX столітті до експериментів із мікрохвильовими технологіями в середині XX століття, історія цієї області наукових досліджень і реалізації інновацій свідчить про поступовий розвиток і поліпшення.

Ранні відкриття в області електромагнітних явищ визначили основу для подальших досліджень, ведучи до розробки трансформаторів, індукційного нагрівання та резонансної індуктивної передачі. Розвиток мікрохвильової технології в середині XX століття відкрив нові можливості для бездротової передачі енергії на великі відстані, що знайшло практичні застосування у проектах, таких як безпілотні літальні апарати та супутники сонячної енергії.

Сучасні досягнення, такі як розробка стандартів індуктивного бездротового заряджання та безпілотних систем передачі енергії, свідчать про актуальність та перспективи цієї технологічної галузі. Огляд історичного контексту дозволяє нам краще зрозуміти етапи розвитку та визначити напрямки подальших досліджень для вдосконалення ефективності та розширення можливостей бездротової передачі електроенергії.

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

2 ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ СИСТЕМ БЕЗДРОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

Бездротова передача електроенергії стала важливим та зручним рішенням для зарядки пристроїв без потреби в фізичних з'єднаннях. За останні роки інтенсивно розвивалися дослідження та технологічні концепції, розширюючи можливості та вдосконалюючи рішення в цьому напрямку. Представлене дослідження включає вичерпний огляд сучасних технологічних концепцій, охоплюючи електромагнітні системи, які пов'язані та незв'язані, а також акустичні технології.

Аналізуються рішення для передачі потужності в широкому діапазоні від міліват до мегават на відстані від міліметрів до кілометрів. Зокрема, вивчається використання хвильових концепцій від кілогерц до терагерц. Такий підхід є привабливим для різноманітних застосувань та відкриває нові можливості. Основні виклики включають досягнення максимальної ефективності та визначення радіусу передачі.

Особлива увага приділяється інноваціям у формуванні променя та у використанні УФ-допоміжного випромінювання. Висвітлено аспекти реалізації, експлуатації, стандартів і питань безпеки в контексті бездротової передачі енергії.

Для підвищення ефективності бездротового з'єднання та долати основні виклики, в роботі обговорюються різні технології та стратегії. Зазначається, що бездротова передача електроенергії є привабливим варіантом зарядки, який дозволяє уникнути роз'ємів та забезпечити надійність у різних умовах експлуатації. Безконтактні рішення також мають потенціал для використання у медичних аплікаціях, де герметичність та можливість легкого дезінфікування є ключовими. Зокрема, обговорюється можливість подовження автономності

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

пристроїв за рахунок зарядки на різних відстанях, що викликає інтерес серед розробників та дослідників. Представлений каталог потенційних застосувань відображає різноманітні технологічні варіанти для бездротової передачі енергії.

Бездротова передача енергії є загальним терміном для кількох різних технологій передачі енергії за допомогою електромагнітних полів. Технології, наведені в таблиці нижче, відрізняються відстанню, на яку вони можуть ефективно передавати потужність, чи повинен передавач бути спрямований (спрямований) на приймача, а також типом електромагнітної енергії. вони використовують: електричні поля, що змінюються в часі, магнітні поля, радіохвилі, мікрохвилі, хвилі інфрачервоного або видимого світла

Передачу енергії бездротовим способом можна широко класифікувати на два типи: радіаційні та безрадіаційні методи, як це вказано на рисунку 2.1 Радіаційні методи включають передачу потужності на значні відстані (що визначаються значно більшими, ніж розмір антени) за допомогою електромагнітних хвиль [11]. Це може охоплювати передачу енергії через радіочастотну [12], мікрохвильову [13], оптичну [14] та ультразвукову [15] технології. Однак через всенаправлену природу радіаційного методу загальна ефективність системи у цьому випадку може бути відносно низькою. Таким чином, для застосувань ближнього поля використовуються безрадіаційні методи. Безрадіаційні методи ґрунтуються на взаємодії магнітного або електричного поля, включаючи ємнісну та індуктивну передачу енергії, як це показано на рисунку 2.2.

Також структуру бездротової передачі електроенергії (WPT) згідно з технологічними категоріями можна класифікувати як: передача енергії на основі електромагнітних та акустичних хвиль, відома як акустична передача енергії (acoustic power transfer – APT). Системи можуть бути як зв'язаними, так і незв'язаними, і використовувати принципи електромагнітних полів.

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18



Рисунок 2.1 – Класифікація методів бездротової передачі енергії

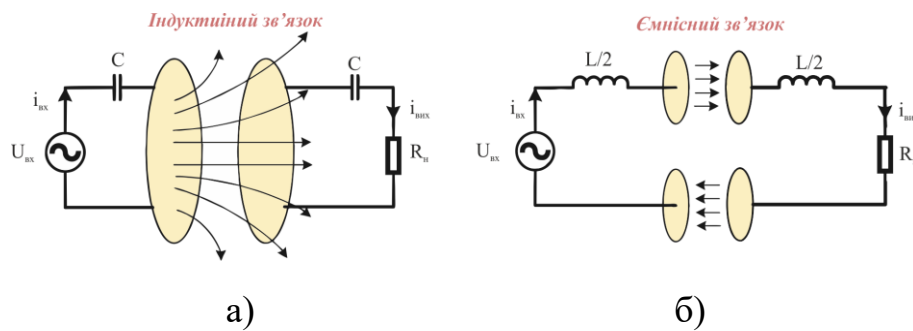


Рисунок 2.2 – Бездротова передача електроенергії за допомогою (а) індуктивного зв'язку та (б) ємнісного зв'язку

Зв'язані системи, які використовують магнітні або електричні поля, класифікуються як індуктивна передача потужності (inductive power transfer – IPT) і ємнісна передача потужності (capacitive power transfer – CPT). Зв'язані

системи передачі енергії базуються на ефективному використанні магнітних або електричних полів для передачі потужності від передавача до приймача.

Незв'язані системи включають радіочастотну передачу потужності (radio frequency power transfer – RFPT), що передбачає бездротовий обмін енергії через радіочастотні хвилі, а також лазерну передачу потужності (laser power transfer – LPT), яка використовує світлові промені для передачі енергії. Одна з ключових відмінностей між зв'язаними та незв'язаними системами є використання фізичного з'єднання для передачі енергії у зв'язаних системах та відсутність такого з'єднання у незв'язаних системах.

Бездротова передача енергії обмежується рядом факторів, які залежать від конкретної технології. В таблиця 2.1 наведено загальний огляд можливостей кожного підходу до передачі енергії. Числові значення в цьому контексті не наводяться, оскільки вони значно залежать від конкретної реалізації. Оглядова таблиця 2.1 консолідує основну інформацію для формування узагальненої картини технологій та їхніх характеристик.

Системи індуктивної передачі потужності (IPT) і ємнісної передачі потужності (CPT) є найпоширенішими зв'язаними системами бездротової передачі енергії. Вони здатні постачати велику потужність (до декількох кількостей ват) на короткі відстані (від декількох міліметрів до кількох метрів) у ближньому полі. Висока ефективність досягається за допомогою індуктивного або ємнісного зв'язку, навіть для систем високої потужності. Основним обмеженням таких систем є обмежені відстані заряджання.

Незв'язані системи, такі як лазерна передача потужності (LPT) і радіочастотна передача потужності (RFPT), розроблені за різними принципами. Реалізації можуть відповідати вимогам щодо безпеки лазерів та стандартам промислового, наукового та медичного діапазонів (ISM). У деяких випадках

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

можуть застосовуватися додаткові засоби безпеки. В таблиці 2.1 наведено ці два підходи відносно до питань безпеки за допомогою косої риски.

Акустична передача енергії (acoustic power transfer – АРТ) зазвичай застосовується в програмах, де важлива мініатюризація або коли важко використовувати електромагнітну (ЕМ) бездротову передачу енергії. У вирішенні імплантованих медичних пристроїв рівні потужності до кількох сотень міліват можуть бути безпечно доставлені, і кілька кіловат можуть передаватися через закриті металеві конструкції товщиною кілька сантиметрів.

Таблиця 2.1 – Базові характеристики різних технологій бездротової передачі енергії

Технологія WPT		Передача потужності	Діапазон	Частота	Ефективність	Біологічний вплив
Індуктивний	IPT	В до М Вт	см	кГц до МГц	висока	другорядний
Ємнісна	CPT	В до к Вт	мм/см	кГц до МГц	висока	другорядний
Лазерна	LPT	В/к Вт	м/км	>ТГц	середній	середній/ значний
Радіочастота	RFPT	м Вт/к Вт	м/км	МГц до ГГц	низький	середній/ значний
Акустичний	ART	м Вт/к Вт	м/см _	к Гц до М Гц	середній	значний/ середній

2.1 Класифікація систем відповідно до принципів передачі

2.1.1 Огляд системи з електромагнітним зв'язком

У бездротових системах передачі енергії, які ґрунтуються на індукції та ємнісному зв'язку, передавач (Tx) та приймач (Rx) знаходяться у тісному взаємозв'язку один з одним. Ефективність цього зв'язку в значній мірі залежить

від кількох конструктивних параметрів, зокрема, від коефіцієнта зв'язку між T_x та R_x . Зазначені технології в бездротовій передачі енергії підтримуються спільною структурою, яка представлена на рисунку 2.3. По-перше, джерело живлення, взаємодіючи із схемою передавача, створює посилений синусоїд, яким можна управляти як за частотою, так і за амплітудою. Для цього використовуються блоки, такі як попередній регулятор, інвертор потужності та генератор хвиль. По-друге, антена передавача з'єднується з антеною приймача за допомогою електричних або магнітних полів. По-третє, схема приймача включає перетворення змінного струму в постійний струм за допомогою випрямляча, згладжуючих конденсаторів і, за необхідності, імпульсного джерела живлення (SMPS).

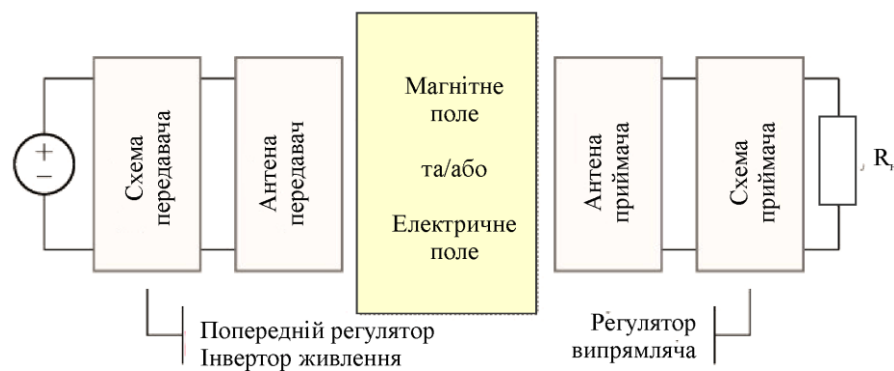


Рисунок 2.3 – Структура бездротової системи передачі електроенергії

2.1.2 Джерело живлення

Джерело живлення є ключовим компонентом систем бездротової передачі енергії. У зв'язку з тим, що системи бездротової передачі енергії не можуть безпосередньо використовувати змінний струм з мережі для живлення схем передавача, необхідне початкове перетворення його на постійний струм. Для цього використовується перетворювач змінного/постійного струму, який може бути реалізований за допомогою кількох методів, які представлені на

рисунку 2.3. Джерело живлення постійного струму грає важливу роль у забезпеченні ефективного функціонування системи бездротової передачі енергії.

Системи, що живляться від мережі, часто включають зворотний перетворювач, який дозволяє отримати безпечну та стабільну напругу постійного струму. Крім того, існує можливість живлення передавача від акумулятора, що додає гнучкість і мобільність системи.

2.1.3 Схема передавача

Попередній регулятор впроваджується у деяких реалізаціях між джерелом живлення та інвертором для управління амплітудою синусоїди, яка подається на антену. Його використання є необов'язковим, оскільки багато систем можуть працювати на фіксованій напрузі. Попередній регулятор може бути представлений у вигляді відповідного комутованого джерела живлення (SMPS), такого як знижувальний, підвищувальний або понижувально-підвищувальний перетворювач, забезпечуючи високу ефективність через низькі втрати.

Щодо інвертора, розглядаються різні типи підсилювачів потужності. Традиційні класи А і В виявляються менш ефективними для додатків бездротової передачі енергії. Замість них, підсилювачі класів С, D і Е можуть забезпечити більш ефективні рішення. У сполучених системах бездротової передачі енергії часто використовують напівмостовий або повномостовий інвертор постійного/змінного струму. Драйвер керує одним або кількома транзисторами для створення посиленого періодичного сигналу. В таких системах можна використовувати різні типи польових транзисторів метал-оксид-напівпровідник (MOSFET), таких як кремнієві FET для низькочастотних інверторів і FET на основі карбіду кремнію (SiC) і нітриду галію (GaN) для високочастотних інверторів.

					КІТР.2021025.02.05	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1.4 Компенсаційна мережа та антена

Схема узгодження необхідна для досягнення максимально високої ефективності зв'язку. Ефективність зв'язку виражається як потужність, отримана антеною приймача, відносно потужності, переданої антеною передачі. Узгоджувальна мережа складається з індуктивного та ємнісного опорів, з'єднаних паралельно та послідовно. У літературі терміни первинний і вторинний резервуар описують комбінацію компенсаційної мережі та антени.

2.1.5 Схема приймача

Конденсатори випрямні та згладжувальні. Змінна напруга, що надходить від антени і компенсаційної мережі, перетворюється в постійну за допомогою випрямляча і згладжуючих конденсаторів. R_n , на рисунку 2.3, представляє навантаження постійного струму. У літературі навантаження змінного струму часто використовується для оптимізації зв'язку та представляє еквівалентне навантаження, безпосередньо підключене до вторинного резонансного бака. Знання схеми випрямляча дозволяє розрахувати відповідне навантаження змінного струму та, особливо в сильних зв'язаних системах, підвищити ККД. Зокрема, існує певне оптимальне навантаження для досягнення максимальної ефективності зв'язку. Зміна параметрів на стороні передавача змінює амплітуду вторинного резонансу і, отже, також змінне навантаження. Вимірювання вторинної напруги та струму в реальному часі та передача їх через канал зворотного зв'язку дозволяє передавачу змінювати амплітуду та частоту для досягнення вищої ефективності зв'язку.

Навантаження постійного та змінного струму в основному змінні, наприклад, під час заряджання акумуляторів. Схеми випрямлення: півхвильові та повнохвильові (з або без подвоєння напруги) випрямлячі є найбільш часто

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

використовуваними діодними схемами для перетворення змінного струму в постійний. Для мінімізації втрат у випрямлячі потрібні діоди з низькою прямою напругою, наприклад, діоди Шоткі. Система WPT часто створюється для конкретного застосування з відомими вихідним струмом і напругою. Параметри діода, такі як прямий струм і пікова зворотна напруга, можна оптимізувати, отримуючи таким чином найнижчу пряму напругу та зменшуючи втрати потужності діода. Крім того, активні випрямлячі досягають вищої ефективності, оскільки вони побудовані на польових транзисторах. Напруга стік-витік нижча порівняно з прямою напругою діода, що призводить до менших втрат енергії. Активні випрямлячі базуються на МОП-транзисторах для низькочастотної комутації або GaN FET для високочастотної комутації. Напівбезмостовий активний випрямляч (S-BAR) також може підвищити ефективність і складається з комбінації діодів і польових транзисторів [16].

DC/DC регулятор. Є кілька причин для встановлення регулятора на стороні приймача. По-перше, потреба в постійній напрузі (ПН) для живлення, наприклад, мікроконтролера. По-друге, постійний струм (ПС) для живлення, наприклад, світлодіода. По-третє, комбінація ПН і ПС для заряджання, наприклад, літєвих батарей із спеціальним профілем заряду ПС-ПН. Як регулятор з низьким падінням (LDO), так і SMPS можна використовувати як регулятор постійного/постійного струму. Як правило, SMPS є більш енергоефективними.

2.2 Індуктивний зв'язок

Магнітні зв'язки в основному представляють собою перетворювачі постійного струму в постійний струм, побудовані на основі трансформатора зі слабким магнітним зв'язком. Типова система включає магнітний зв'язок між вторинною та первинною котушками, які збуджуються змінним струмом. Дві

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

катушки формують трансформатор без сердечника, зв'язок якого визначається коефіцієнтом зв'язку (k_m). Змінний струм, що протікає через первинну катушку, створює змінне магнітне поле відповідно до закону Ампера. Змінний магнітний потік у вторинній катушці індукує електрорушійну силу відповідно до закону індукції Фарадея, що в поєднанні зазначається як IPT (індуктивна передача потужності).

Ключовим аспектом створення ефективної системи IPT є розуміння факторів, які визначають її ефективність. Резистивні втрати в катушках та коефіцієнт зв'язку між двома катушками визначають ефективність в значній мірі. Коефіцієнт зв'язку можна обчислити за допомогою рівняння (2.1) і залежить від взаємної індуктивності M та самоіндуктивності катушок передавача і приймача L_1 і L_2 відповідно.

$$k_m = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (2.1)$$

Індекс m використовується для позначення того, що він працює на принципах змінних магнітних полів.

Якщо відстань між катушками збільшується, взаємна індуктивність швидко зменшиться, що призведе до зниження коефіцієнта зв'язку. Це значне зменшення зв'язку зі збільшенням відстані вказує на те, що WPT за допомогою індуктивного зв'язку може покривати лише невеликі відстані. Основна система IPT зображена на рисунку 2.4 і містить джерело змінного струму, дві катушки L_1 - L_2 і навантаження змінного струму R_n . Це еквівалентне навантаження змінного струму представляє випрямляч, регулятор DC/DC та навантаження DC.

					КІПТР.2021025.02.05	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимізацію ефективності, а саме індуктивний зв'язок. Однак переважно використовується метод критичного зв'язку, коли і приймач, і передавач налаштовані на однакову резонансну частоту. Різні дослідження описують ефективність системи MRC [25, 26, 27].

2.4 Електродинамічний зв'язок

Система бездротової передачі енергії з електродинамічним зв'язком доставляє енергію від котушки передавача до електромеханічного приймача за допомогою низькоамплітудних і низькочастотних магнітних полів і зображена на рисунку 2.6. Відстань передачі енергії зазвичай становить від кількох міліметрів до сантиметрів. Передавач створює крутний момент на постійному магніті, розташованому на стороні приймача. Величина крутного моменту залежить від відстані та орієнтації між передавачем і приймачем. Механічна енергія перетворюється на електричну за допомогою таких перетворювачів, як електродинамічні, п'єзоелектричні або електростатичні перетворювачі.

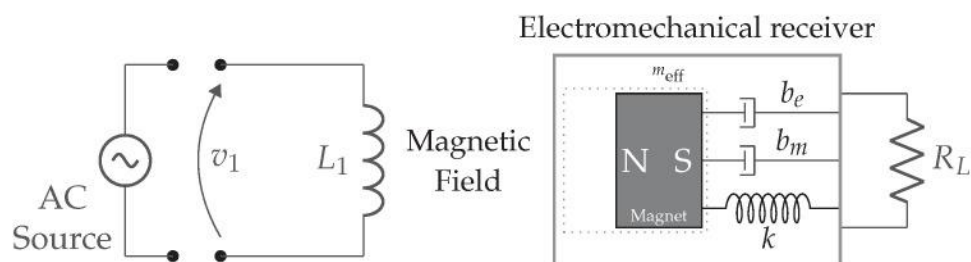


Рисунок 2.6 – Електродинамічно пов'язана система бездротової передачі енергії з електромеханічним приймачем

Кількість переданої енергії зазвичай становить лише кілька сотень мікват. У порівнянні з системами бездротової передачі енергії з індуктивним зв'язком, він має дуже низьку ефективність у діапазоні від 4,1% до 12%. Через

низьку робочу частоту потрібні котушки з величезною кількістю обмоток. З іншого боку, ця технологія базується на механічному резонансі електромеханічного приймача для передачі енергії, що дозволяє використовувати набагато нижчі резонансні частоти (наприклад, 40кГц), ніж інші технології бездротової передачі енергії. Таким чином, сила магнітного поля може бути вищою без перевищення безпечних меж впливу на людину.

2.5 Ємнісний зв'язок

Цей підхід заснований на електричних полях між пластинами для передачі енергії. Типова система складається з двох конденсаторів. Чотири металеві пластини утворюють ліву і праву сторону конденсаторів C_A і C_B , як показано на рисунку 2.7. Постачання цієї системи змінною напругою створює електричне поле. На стороні приймача електричне поле індукуює струм. При роботі на досить високих частотах ці конденсатори діятимуть як провідники. Перевагами цієї технології є менша вартість передавача та приймача, знижений вплив на ефективність за наявності оточуючих металевих предметів і менший розмір порівняно з IPT. Відстань між двома пластинами коливається від кількох міліметрів до десятків см. Завдяки максимальній напруженості поля у вигляді електричного пробую щільність потужності розриву СРТ у повітрі в 400 разів нижча, ніж IPT. Бездротова передача енергії на великих відстанях, наприклад, 15 см, вимагає кількох несприятливих методів, таких як висока напруга, великі пластини, високі частоти перемикування та сильні електричні поля. Останнє викликає занепокоєння щодо безпеки навколишньої території.

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

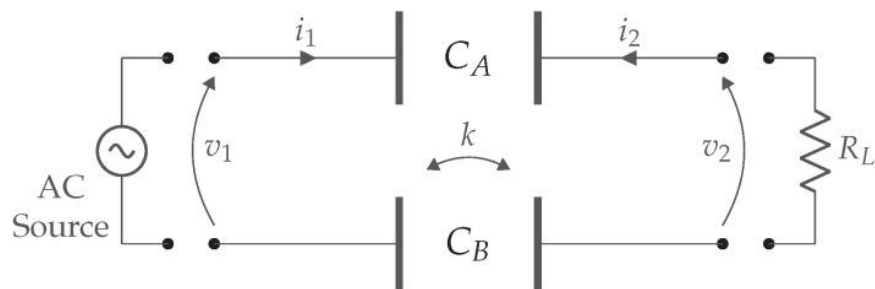


Рисунок 2.7 – Принципова схема системи бездротової передачі енергії з ємнісним зв'язком

2.6 Порівняльний аналіз індуктивного зв'язку та ємнісного зв'язку

Ємнісна передача потужності використовує змінні у часі електричні поля для передачі енергії. В цій системі електричні поля створюються між провідними пластинами, які мають позитивний та негативний заряди. Оскільки ємнісна передача потужності не викликає вихрових струмів та не потребує феритових компонентів, це дозволяє зменшити розмір і вагу системи. Крім того, ємнісна передача потужності є менш чутливою до електромагнітних перешкод та не вимагає великих зусиль з екранування.

Індуктивна передача потужності використовує змінні у часі магнітні поля для передачі енергії. У системі індуктивної передачі потужності силові лінії магнітного поля проникають через котушки і повертаються назад до джерела. У порівнянні з ємнісною передачею потужності, у індуктивній передачі потужності необхідно контролювати та направляти магнітне поле, оскільки воно не має магнітних монополів.

Однією з переваг використання магнітних полів є різниця у проникності та діелектричній проникності вільного простору, що забезпечує більшу ефективність індуктивної передачі потужності. Велика проникність магнітного поля порівняно з діелектричною проникністю забезпечує велику інтенсивність

електричних полів для створення порівнянних струмів у ємнісній передачі потужності.

У таблиця 2.2 наведено підсумкове порівняння між індуктивним та ємнісним зв'язками.

Таблиця 2.2 – Порівняння між індуктивною та ємнісною бездротовою передачею енергії

Індуктивний зв'язок	Ємнісний зв'язок
Використовує змінні в часі магнітні поля.	Використовує електричні поля, що змінюються в часі.
Магнітні поля протікають через котушки і повертаються до джерела.	Електричні поля починаються і закінчуються на провідних пластинах.
Шлях магнітного поля потрібно контролювати та направляти, тому потрібні ферити.	Електричні поля обмежені, тому ферити не потрібні.
Більш чутливий до перекосів.	Більш толерантний до зміщення.
Індуковані напруги залежать від проникності вільного простору.	Струми зміщення залежать від діелектричної проникності вільного простору.
Менш чутливий до зміни параметрів.	Більш чутливий до змін параметрів.
Для однакового рівня потужності та відстані розмір сполучників менший для індуктивної передачі потужності.	Для того самого рівня потужності та відстані розмір сполучників більше для ємнісної передачі потужності.

Ефективність як ємнісної, так і індуктивної передачі енергії можна підвищити, використовуючи системи бездротової передачі енергії в мегагерцевому діапазоні. Підвищення частоти роботи допомагає зменшити розмір магнітних компонентів і підвищити щільність потужності системи. Однак

важливо враховувати, що кремнієві (Si) МОП-транзистори не є оптимальним вибором для роботи на частоті МГц через збільшені втрати при перемиканні.

Проблеми, пов'язані з кремнієвими транзисторами, включають менший час увімкнення та вимкнення, обумовлений великими значеннями ємності затвора. З цієї причини пристрої з широкою забороненою зоною (ШЗЗ), такі як карбід кремнію та нітрид галію, виявляються більш ефективними для застосувань у високочастотному діапазоні, оскільки вони мають вищу швидкість насичення електронів.

Пристрої з широкою забороненою зоною володіють іншими перевагами, такими як менший опір у відкритому стані через високе критичне електричне поле та вищу напругу пробою порівняно з Si-пристроями за рахунок більшої забороненої зони.

2.7 Розгляд існуючих стандартів бездротової передачі енергії

Система бездротової передачі енергії знаходить широке застосування в різноманітних галузях, таких як зарядка портативної електроніки [36, 37, 38, 39, 40], електричні транспортні засоби [41, 42, 43, 44, 45], електричні дрони, автоматизовані керовані транспортні засоби [46, 47, 48, 49, 50], медичні імплантати [51, 52, 53, 54, 55], генерація плазми [56] та автоматизація на підприємствах [57, 58, 59, 60]. На сьогоднішній день існують два основних стандарти для індукційної бездротової передачі енергії: Qi і AirFuel Alliance.

Стандарти Qi і AirFuel є нормативами для бездротової передачі енергії, зокрема для зарядки пристроїв.

Бездротовий стандарт Qi розроблений Консорціумом бездротової енергії. Цей стандарт визначає специфікації для індукційної бездротової зарядки, що використовує стандартні котушки для передачі енергії. Широко

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

використовується для зарядки портативних електронних пристроїв, таких як смартфони, навушники і інші гаджети.

AirFuel – це інша група стандартів для бездротової передачі енергії, яку розробляє AirFuel Alliance. Вона включає кілька технологій, включаючи індукційну та резонансну передачу енергії. Використовується для зарядки різноманітних пристроїв, включаючи портативну електроніку та електричні транспортні засоби.

Обидва ці стандарти регулюють технології бездротової зарядки, забезпечуючи сумісність між пристроями різних виробників, які підтримують ті чи інші стандарти. У таблиці 2.3 наведено специфікації стандартів зарядки Qi та AirFuel.

Таблиця 2.3 – Стандарти бездротової передачі енергії Qi і AirFuel

Стандартний	Qi (один передавач)	Qi (кілька передавачів)	AirFuel
Частота	100–205 кГц	100–205 кГц	6,78 МГц
Позиціонування приймача	Точний	Гнучкий в горизонтальних напрямках	Вільне позиціонування (до 3 см свободи по вертикалі)
Кількість приймачів	Один	Один	Кілька (до восьми)
Зв'язок Rx-Tx	Внутрішньосмуговий	Внутрішньосмуговий	Bluetooth або In-band

Архітектура базової системи бездротової передачі енергії для живлення кількох портативних електронних пристроїв представлена на рисунку 2.8. Початково, змінний струм з лінії живлення перетворюється на постійний за допомогою випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності (PFC). Постійна напруга далі конвертується у змінну за допомогою високочастотного інвертора або топології підсилювача потужності, яка впливає на котушку передавача через компенсаційну мережу. Магнітні поля, випромінені цією котушкою,

сприймаються котушками приймача. Після проходження через компенсаційну мережу, струм приймача випрямляється та піддається обробці за допомогою перетворювача постійного струму, що відповідає вимогам навантаження. Для оптимізації системи та зменшення кількості компонентів, а також втрат в силовій електроніці, можна об'єднати випрямляч з корекцією коефіцієнта потужності та каскади високочастотного інвертора в єдиний каскад для конвертації змінного струму у змінний. Також можна інтегрувати випрямляч з корекцією коефіцієнта потужності з блоком умовної обробки живлення на приймачі, створивши інтегрований активний випрямляч. Цей останній може забезпечувати постійне керування напругою або постійним струмом для заряджання акумуляторів портативної електроніки.

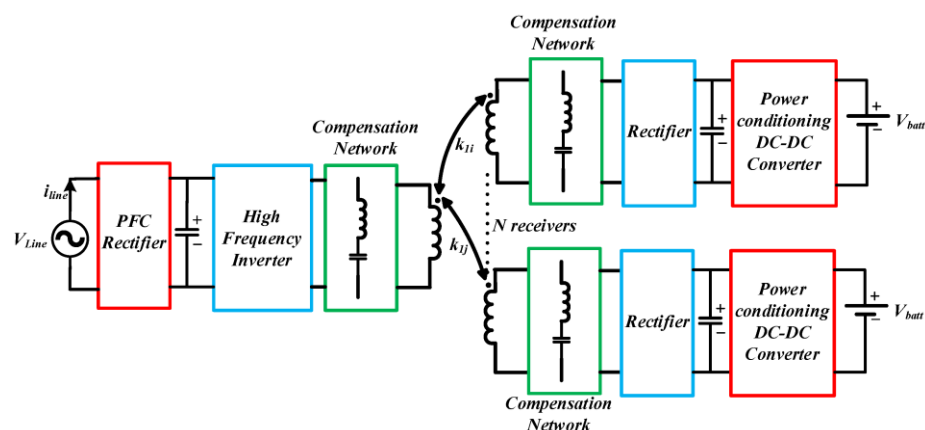


Рисунок 2.8 – Архітектура системи бездротової передачі енергії з кількома приймачами

Багато робіт присвячують увагу методикам бездротової передачі енергії у різних областях застосувань [26, 27, 28]. Стаття [26] включає порівняння методів ближнього та далекого поля, з фокусом на формі та матеріалі котушок, а також їх розташуванні. Згадана у [27] стаття пропонує методи моделювання та оптимізації ефективності систем бездротової передачі енергії, зосереджуючись на статичній та динамічній зарядці електромобілів. В [28] розглядаються методи

оптимізації дизайну котушок, повторювачів, компенсаційних мереж тощо, з освітленням проблем, що виникають при проектуванні бездротової передачі енергії.

2.7 Висновок до другого розділу

У цьому розділі розглянуто важливий напрямок технологічних досліджень – бездротову передачу енергії для портативних електронних пристроїв. Огляд охопив широкий спектр аспектів цієї технології, включаючи її застосування, технічні рішення, проблеми і перспективи. Надано комплексний огляд останніх досягнень у цій галузі та розглянули ключові проблеми, які виникають під час впровадження технології бездротової передачі енергії. Розглянуто методи підвищення ефективності систем бездротової передачі енергії та висвітлили проблеми, пов'язані з конструкцією котушок, електромагнітним екрануванням та виявленням сторонніх предметів.

					КІТР.2021025.02.05	Арк.
						36
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3 АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ ВТОРИННИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ У КОНТЕКСТІ БЕЗДРОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

3.1 Методи оптимізації ефективності системи бездротової передачі електроенергії

Подібно до аналізу резонансних перетворювачів, системи бездротової передачі електроенергії можна розглядати як у частотній, так і у часовій областях [29], з кожним методом моделювання мають свої переваги. Моделювання у часовій області забезпечує більш точні результати та може враховувати режими переривчастої провідності системи бездротової передачі електроенергії. Однак для такого аналізу потрібна інформація про еквівалентні стани схеми, що може бути отримана за допомогою моделювання чи експериментів.

Додавання послідовних опорів котушок, опори еквівалентного серійного опору конденсаторів та опори напівпровідників у відкритому стані може призвести до диференціальних рівнянь з експоненціальними членами, ускладнюючи рішення. Моделювання у часовій області також може стати непродуктивним при аналізі систем із кількома приймачами та перехресним зв'язком, оскільки рішень в закритій формі може не існувати.

З іншого боку, модель частотної області, зокрема метод першого гармонічного наближення (ФНА), є більш вигідною для аналізу систем бездротової передачі електроенергії. Рішення ФНА надають загальне уявлення про систему, але можуть бути неоптимальними для точного проектування компонентів, особливо при наявності домінуючих гармонік в напругах та струмах.

					КІТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Розгляд гармонік на стороні джерела та навантаження стає важливим для ефективного проектування та може легко розширюватися на випадок систем із декількома приймачами [30].

Головною метою бездротової передачі енергії в портативних електронних пристроях є забезпечення достатньої енергії для пристрою з максимальною ефективністю. Система бездротової передачі енергії включає в себе кілька етапів перетворення електроенергії, таких як DC-AC, AC-AC і AC-DC. Кожен з цих етапів має унікальну точку роботи, що максимізує ефективність з урахуванням робочої частоти чи опору навантаження. Таким чином, багато досліджень були зосереджені на покращенні загальної ефективності системи шляхом вирішення завдань на рівні системного проектування.

Даний розділ присвячений розгляданню стратегій та методів для підвищення ефективності бездротового з'єднання. Розглядаються можливі шляхи оптимізації роботи кожного етапу перетворення, а також підходи до покращення взаємодії між ними. Особлива увага приділяється точкам спрацьовування на кожному етапі, що сприяє максимізації ефективності системи. Подальше дослідження спрямоване на розробку інтегрованих стратегій проектування на рівні системи для досягнення оптимальної ефективності бездротового з'єднання в портативних електронних пристроях.

Враховуючи різноманіття програм та їх вимог до бездротових систем передачі електроенергії, слід зазначити, що існують випадки, коли регулювання вторинної сторони не є необхідним аспектом. Розглядаючи конкретну ситуацію, коли адаптація до навантаження на вторинній стороні не потрібна, аналізована система використовує стандартні мостові діодні випрямлячі для випрямлення сигналів на вторинній стороні (рис. 3.1a). Зазначимо, що блок С представляє собою компенсаційну мережу, яка може мати різні конфігурації та типи (рис. 3.1a).

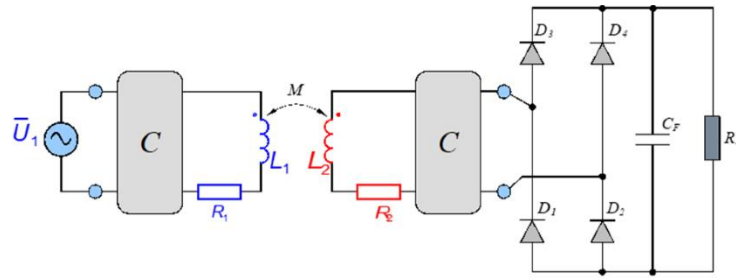


Рисунок 3.1 – Еквівалентна схема бездротової системи передачі електроенергії зі стандартним мостовим діодним випрямлячем вторинної сторони

Оскільки бездротова передача електроенергії наразі визначається як важливий аспект забезпечення електроенергією для різноманітних застосувань, дослідження продуктивності системи живлення стає ключовим для визначення оптимальної топології випрямляча на вторинній стороні. На рисунку 3.2 представлена одна можлива альтернативна топологія, де верхні діоди мостового випрямляча заміщені котушками індуктивності без будь-якого загального магнітного зв'язку. Ця конфігурація відноситься до випрямляча струмового типу, і її робоча характеристика є об'єктом подальших досліджень у цій роботі.

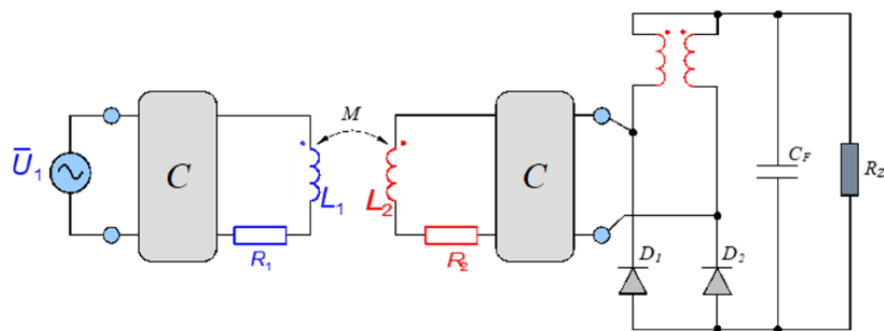


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема бездротової системи передачі енергії з модифікованим діодним випрямлячем вторинної сторони

3.2 Принципи роботи випрямляча струму в системі бездротової передачі енергії

Для роз'яснення принципу роботи випрямляча струмового типу на вторинній стороні бездротової системи передачі електроенергії спочатку припускається, що джерело живлення є гармонічним (рисунок 3.3), і враховується лише перша гармоніка. Навіть якщо це може призвести до певної похибки у математичній моделі, ця похибка не є вирішальною для пояснення оперативної продуктивності. У цьому випадку більше акценту приділяється якісному поясненню, а не точному математичному опису на початковому етапі. Крім того, необхідно враховувати специфічну вольт-амперну характеристику конкретного діода. Схема для проведення аналізу наведена на рисунку 3.4.

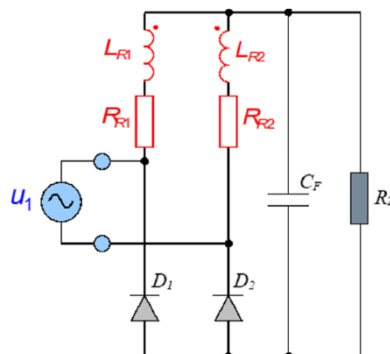


Рисунок 3.3 – Випрямляч струмового типу з гармонічним джерелом живлення

Оскільки обидві котушки індуктивності замінюють діоди, для них розглядаються однакові електричні властивості. За умови синусоїдального сигналу від джерела u_1 напруги живлення, робочий цикл випрямляча розподіляється на два симетричних інтервали – інтервал А та інтервал В (рис. 3.4).

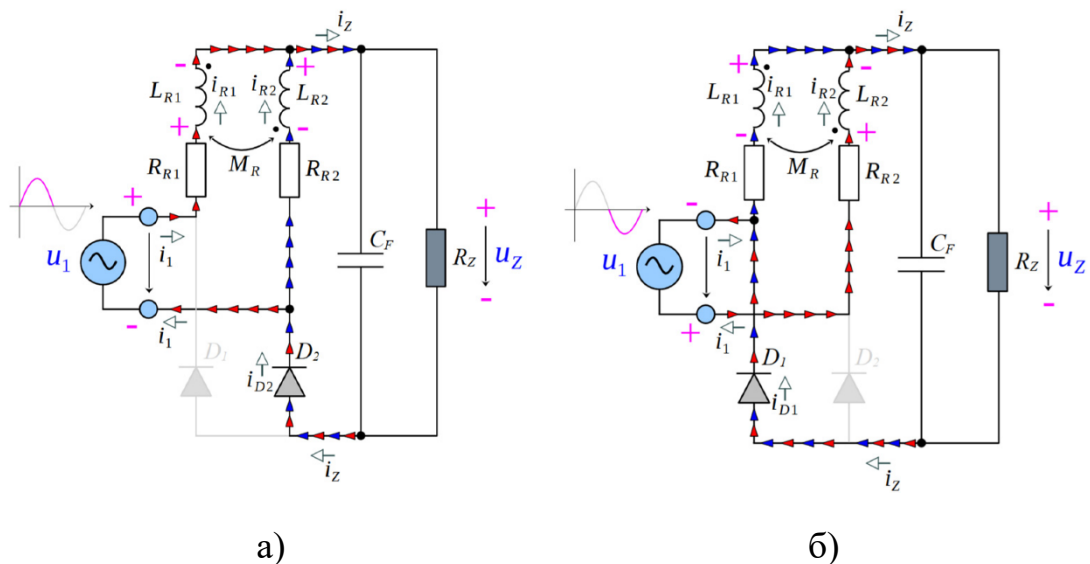


Рисунок 3.4 – а) – Робота протягом інтервалу часу А;
 б) – Еквівалентна операція протягом інтервалу часу Б

- ІНТЕРВАЛ А

Цей період належить інтервалу часу $0 < t < T/2$. Під час цього інтервалу напруга живлення є позитивною, і струм проходить через індуктивність L_{R1} , паралельно з'єднану з навантаженням $C_F \parallel R_Z$, та через діод D_2 , повертаючись до джерела живлення. Також індуктор L_{R2} підтримує цей струм через енергію, яка була поглинена протягом попереднього робочого циклу.

- ІНТЕРВАЛ Б

Цей період входить в інтервал часу $T/2 < t < T$. Під час цього інтервалу напруга живлення має від'ємну полярність, і струм проходить через індуктивність L_{R2} , паралельно з'єднану з навантаженням $C_F \parallel R_Z$, та через діод D_1 , повертаючись до джерела живлення. Також індуктор L_{R1} підтримує цей струм через енергію, яка була поглинена протягом попереднього робочого циклу.

3.3 Аналітичний підхід до оптимального проектування індукторів подвоєння струму

Математичне представлення обох робочих інтервалів виражено в рівнянні (3.1). З використанням припущення про ідеальність котушок передавача та приймача системи бездротового передавання енергії ($R_{R1} = R_{R2} = 0$) та враховуючи, що поріг напруги діодів $u_{D1} = u_{D2} = 0$, рівняння (3.1) можна спростити до більш доступної форми, яка описана у рівнянні (3.2)

$$\left(0 < t < \frac{T}{2}\right) \begin{cases} \frac{d}{dt} i_{R1} = \frac{1}{L_{R1}} (u_1 - u_Z - u_{D2} - R_{R1} i_{R1}) \\ \frac{d}{dt} i_{R2} = \frac{1}{L_{R2}} (u_Z + u_{D1} + R_{R2} i_{R2}) \end{cases}$$

$$\left(\frac{T}{2} < t < T\right) \begin{cases} \frac{d}{dt} i_{R2} = \frac{1}{L_{R2}} (u_1 - u_Z - u_{D1} - R_{R2} i_{R2}) \\ \frac{d}{dt} i_{R1} = \frac{1}{L_{R1}} (u_Z + u_{D1} + R_{R1} i_{R1}) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\left(0 < t < \frac{T}{2}\right) \begin{cases} \frac{d}{dt} i_{R1} = \frac{1}{L_{R1}} (u_1 - u_Z) \\ \frac{d}{dt} i_{R2} = \frac{u_Z}{L_{R2}} \end{cases}$$

$$\left(\frac{T}{2} < t < T\right) \begin{cases} \frac{d}{dt} i_{R2} = \frac{1}{L_{R2}} (u_1 - u_Z) \\ \frac{d}{dt} i_{R1} = \frac{u_Z}{L_{R1}} \end{cases} \quad (3.2)$$

Якщо $L_{R1} = L_{R2}$, як припускається, то можна виокремити схожість у виразах для струмів i_{R1} та i_{R2} з виразу (3.2). Різниця в області знаків обумовлена взаємним зсувом фаз на 180° . Залежні від часу струми можна точно виразити шляхом інтегрування (3.2), що призводить до рівнянь (3.3) і (3.4) відповідно.

$$\begin{aligned}
& \left(0 < t < \frac{T}{2} \right) \\
i_{R1}(t) &= i_{R1}(0) + \frac{U_m}{\omega L_{R1}} (1 - \cos(\omega t)) - \frac{u_Z}{L_{R1}} t; \quad U_m = \sqrt{2u_1} \\
& \left(\frac{T}{2} < t < T \right) \\
i_{R1}(t) &= i_{R1}\left(\frac{T}{2}\right) + \frac{u_Z}{L_{R1}} \left(\frac{T}{2} - t\right)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
& \left(0 < t < \frac{T}{2} \right) \\
i_{R2}(t) &= i_{R2}(0) - \frac{u_Z}{L_{R2}} t \\
& \left(\frac{T}{2} < t < T \right) \\
i_{R2}(t) &= i_{R2}\left(\frac{T}{2}\right) + \frac{U_m}{\omega L_{R2}} (1 + \cos(\omega t)) + \frac{u_Z}{L_{R2}} \left(\frac{T}{2} - t\right)
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Припускаючи, що виконується умова $L_{R1} = L_{R2} = L_{R0}$, отримано вирази для струмів за допомогою рівнянь (3.5) і (3.6):

$$\begin{aligned}
& \left(0 < t < \frac{T}{2} \right) \\
i_{R1}(t) &= i_{R1}(0) + \frac{U_m}{\omega L_{R0}} (1 - \cos(\omega t)) - \frac{u_Z}{L_{R0}} t \\
& \left(\frac{T}{2} < t < T \right) \\
i_{R1}(t) &= i_{R1}\left(\frac{T}{2}\right) + \frac{u_Z}{L_{R0}} \left(\frac{T}{2} - t\right)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
& \left(0 < t < \frac{T}{2} \right) \\
& i_{R2}(t) = i_{R2}(0) - \frac{u_Z}{L_{R0}} t \\
& \left(\frac{T}{2} < t < T \right) \\
& i_{R2}(t) = i_{R2}\left(\frac{T}{2}\right) + \frac{U_m}{\omega L_{R0}} (1 + \cos(\omega t)) + \frac{u_Z}{L_{R0}} \left(\frac{T}{2} - t\right).
\end{aligned} \tag{3.6}$$

З урахуванням періодичності характеру i_{R1} і i_{R2} , можна визначити рівняння (3.7):

$$\begin{aligned}
i_{R2}(0) &= i_{R1}\left(\frac{T}{2}\right) \\
i_{R2}\left(\frac{T}{2}\right) &= i_{R1}(0).
\end{aligned} \tag{3.7}$$

За допомогою виразу (3.7) можна обчислити середні значення обох досліджуваних струмів, а саме I_{R1} та I_{R2} , як показано у виразі (3.8):

$$\begin{aligned}
I_{R1} &= \frac{1}{T} \left[\int_0^{T/2} \left(i_{R1}(0) + \frac{U_m}{\omega L_{R0}} (1 - \cos(\omega t)) - \frac{u_Z}{L_{R0}} t \right) dt \right. \\
& \quad \left. + \int_{T/2}^T \left(i_{R1}(0) + \frac{U_m}{\omega L_{R0}} \left(1 - \cos\left(\omega \frac{T}{2}\right) \right) - \frac{u_Z}{L_{R0}} \frac{T}{2} + \frac{u_Z}{L_{R0}} \left(\frac{T}{2} - t\right) \right) dt \right] \\
&= i_{R1}(0) + \frac{3}{2} \frac{U_m}{\omega L_{R0}} - \frac{T}{2} \frac{u_Z}{L_{R0}} \\
I_{R1} &= \frac{1}{T} \left[\int_0^{T/2} \left(i_{R1}(0) + \frac{U_m}{\omega L_{R0}} (1 - \cos(\omega t)) - \frac{u_Z}{L_{R0}} \frac{T}{2} - \frac{u_Z}{L_{R0}} t \right) dt \right. \\
& \quad \left. + \int_{T/2}^T \left(i_{R1}(0) + \frac{U_m}{\omega L_{R0}} \left(1 + \cos\left(\omega \frac{T}{2}\right) \right) + \frac{u_Z}{L_{R0}} \left(\frac{T}{2} - t\right) \right) dt \right] \\
&= i_{R1}(0) + \frac{3}{2} \frac{U_m}{\omega L_{R0}} - \frac{T}{2} \frac{u_Z}{L_{R0}}.
\end{aligned} \tag{3.8}$$

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримане рівняння (3.8) лише підтверджує раніше зроблене припущення про ідентичні форми хвиль обох струмів, враховуючи їх фазовий зсув. Типові сигнали можна візуалізувати, як наведено на рисунку 3.5.

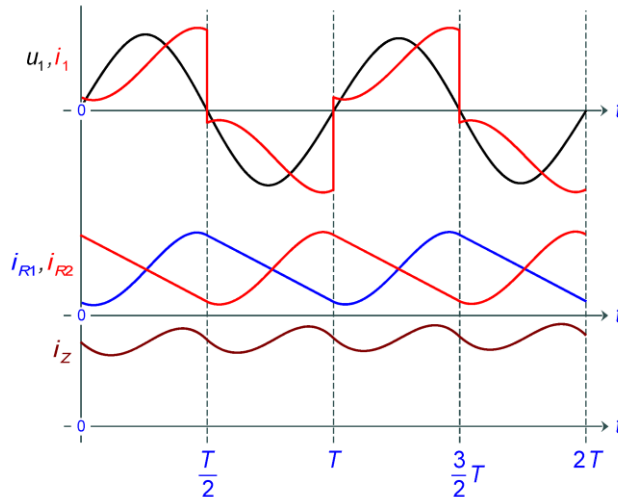


Рисунок 3.5 – Часові форми сигналу випрямляча з подвоювачем струму

В цей момент встановлено відношення між напругою та струмом кола, а також розглянуто значення постійної напруги навантаження. З урахуванням періодичності струму справедлива умова $i_{R1}(T) = i_{R1}(0)$. Таким чином, з використанням виразу (3.5), можна отримати вираз (3.9):

$$i_{R1}\left(\frac{T}{2}\right) + \frac{u_Z}{L_{R0}}\left(\frac{T}{2} - T\right) = i_{R1}(0) \quad (3.9)$$

Для отримання необхідних відношень важливо підставити значення $i_{R1}(T/2)$, при цьому рівняння (3.10) буде виглядати наступним чином:

$$i_{R1}(0) + \frac{U_m}{\omega L_{R0}} \left(1 - \cos\left(\omega \frac{T}{2}\right) \right) - \frac{U_Z T}{L_{R0} 2} + \frac{U_Z}{L_{R0}} \left(\frac{T}{2} - T \right) = i_{R1}(0) \quad (3.10)$$

З виразу (3.10) можна визначити невідомі відношення наступним чином:

$$\begin{aligned} i_{R1}(0) + 2 \frac{U_m}{\omega L_{R0}} - \frac{U_Z T}{L_{R0} 2} + \frac{U_Z}{L_{R0}} \left(\frac{T}{2} - T \right) &= i_{R1}(0) \\ \Downarrow \\ 2 \frac{U_m}{2\pi f L_{R0}} &= \frac{U_Z}{L_{R0}} \frac{1}{f} \\ \Downarrow \\ \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_1 &= U_Z \end{aligned} \quad (3.11)$$

З урахуванням інваріантності потужностей в ідеальному випадку передачі потужності, що означає, що $U_1 I_1 = U_Z I_Z$ при повному резонансному стані, коефіцієнт струму може бути виражений простим чином (3.12).

$$\frac{\pi}{\sqrt{2}} I_1 = I_Z \quad (3.12)$$

Тепер опис є в цілому точним; проте в реальних програмах невеликі нерезонансні стани можуть ігноруватися з допустимою похибкою.

Для повноти зображення буде визначено значення $i_{R1}(0)$, необхідне для розрахунку всіх струмів системи. Ця процедура виконана з припущенням, що струм навантаження визначається миттєвою сумою струмів $i_{R1}(t)$ і $i_{R2}(t)$. Зазначене вираження описується формулою (3.13).

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

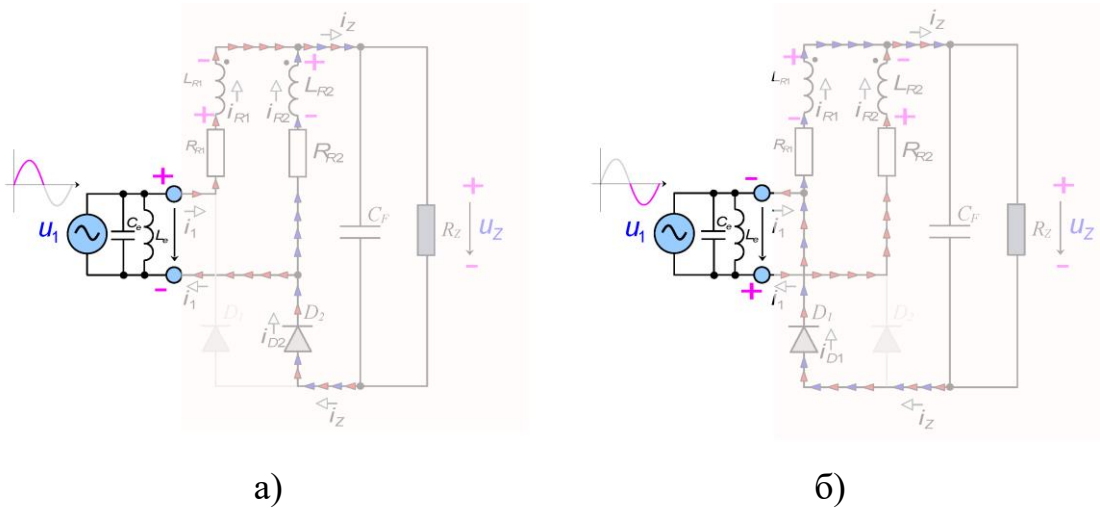


Рисунок 3.6 – Робота під час інтервалу А, включаючи компенсаційну мережу (а). Еквівалентна робота під час інтервалу Б, враховуючи компенсаційну мережу (б)

З цієї причини логічним кроком є виконання гармонійної декомпозиції відношень, визначених у (3.14), за допомогою перетворення Фур'є і таким чином отримання його фундаментальної гармоніки у формулі (3.16). Параметри a_0 , a_1 і b_1 , використувані у (16), позначають коефіцієнти Фур'є.

$$i_1(t) \approx \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) \quad (3.16)$$

Підставляючи вираз (3.11) у вираз (3.15), отримано вираз для повної форми вхідного струму, який відображений у формулі (3.17).

$$\begin{aligned}
 & 0 < t < \frac{T}{2} \\
 i_1(t) &= \frac{U_Z}{2R_Z} - \frac{U_Z}{2\omega L_{R0}} + \frac{U_Z \pi}{2\omega L_{R0}} (1 - \cos(\omega t)) - \frac{U_Z}{L_{R0}} t; \\
 & \frac{T}{2} < t < T \\
 i_1(t) &= \frac{U_Z}{2R_Z} - \frac{U_m \pi}{2\omega L_{R0}} + \frac{U_Z \pi}{2\omega L_{R0}} (1 + \cos(\omega t)) + \frac{U_Z}{L_{R0}} \left(\frac{T}{2} - t \right)
 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Коефіцієнти Фур'є визначаються через рівняння (3.18), яке дозволяє визначити їх значення у контексті аналізу гармонічної структури вхідного струму.

$$a_0 = \frac{2}{T_0} \int_0^T i_1(t) dt = 0$$

$$a_1 = \frac{2}{T_0} \int_0^T i_1(t) \cos(\omega t) dt = - \left(\frac{\pi^2 - 4}{\pi^2} \right) \frac{U_Z \pi}{\omega L_{R0}} \quad (3.18)$$

$$b_1 = \frac{2}{T_0} \int_0^T i_1(t) \sin(\omega t) dt = \frac{2U_Z}{\pi R_Z} + \left(\frac{\pi - 1}{\pi} \right) \frac{2U_Z}{\omega L_{R0} R_Z}$$

Тоді основну гармоніку струму можна описати за допомогою виразу (3.19):

$$i_1(t) \approx \left[\frac{2U_Z}{\pi R_Z} + \left(\frac{\pi - 1}{\pi} \right) \frac{2U_Z}{\omega L_{R0} R_Z} \right] \sin(\omega t) - \left(\frac{\pi^2 - 4}{\pi^2} \right) \frac{U_Z \pi}{\omega L_{R0}} \cos(\omega t) \quad (3.19)$$

Струм i_1 можна представити як суму двох гармонійних хвиль: перша гармоніка відповідає функції синуса, тоді як друга гармоніка відповідає функції мінус косинуса. Оскільки напруга u_1 змінюється відповідно до функції синуса, перша складова струму знаходиться в фазі з напругою, а друга відстає на 90° . З точки зору аналізу першої гармоніки, другу складову можна розглядати як уявну частину сумарного струму.

Звернемо увагу, що $u_1 = U_m \sin(\omega t)$ є дійсним; використовуючи рівняння (3.20), можна визначити, що два струми зсунуті по фазі на 90° , причому перший з них має чисто омічний характер, а другий є уявним.

$$i \frac{u_1}{i_1} \approx \frac{U_1}{I_1} \approx \frac{\frac{\pi U_Z}{\sqrt{2}} \sin(\omega t)}{\left[\frac{2}{\sqrt{2}} \frac{U_Z}{\pi R_Z} + \left(\frac{\pi-1}{\pi} \right) \frac{2}{\sqrt{2}} \frac{U_Z}{\omega L_{R0} R_Z} \right] \sin(\omega t) - \left(\frac{\pi^2-4}{\pi^2} \right) \frac{U_Z \pi}{\omega L_{R0} \sqrt{2}} \cos(\omega t)} . \quad (3.20)$$

Щодо напруги живлення, випрямляч проявляє себе як навантаження, що складається з паралельного опору та індуктивності. Ця індуктивність має негативний вплив на коефіцієнт потужності випрямляча, і її ефект потрібно компенсувати. Таким чином, з рівняння (3.20) можна визначити уявну компоненту імпедансу (3.21),

$$\Im \left\{ \frac{U_1}{I_1} \right\} \approx \frac{\frac{\pi U_Z}{\sqrt{2}}}{\left(\frac{\pi^2-4}{\pi^2} \right) \frac{U_Z \pi}{\omega L_{R0} \sqrt{2}}} = \left(\frac{\pi^2-4}{\pi^2} \right) \omega L_{R0} \Rightarrow L_e = \left(\frac{\pi^2-4}{\pi^2} \right) L_{R0} . \quad (3.21)$$

який, серед інших, вказує на шлях відбитої індуктивності L_{R0} на входні клеми випрямляча, а саме – перетвореної індуктивності L_e . Його вплив можна повністю скоригувати за допомогою додаткового конденсатора C_e (3.22), який підключений паралельно до входних клем випрямляча (рис. 3.6).

$$C_e = \frac{1}{2\omega^2 L_e} = \frac{1}{\omega^2 \left(\frac{\pi^2}{\pi^2-4} \right) L_{R0}} . \quad (3.22)$$

Цей одиничний коефіцієнт потужності гарантує, що і входна напруга, і споживаний струм знаходяться в фазі.

Останнім кроком є визначення значення індуктивності L_{R0} . Рівняння (3.2) слід використовувати як початкову умову. У поєднанні з рівняннями (3.11) і (3.12), які розглядають гармонійні форми сигналів, отримуємо формулу для індуктивності (3.23).

$$L_{R0} = \frac{R_Z}{\omega} \left(\frac{\pi - 1}{\pi} \right). \quad (3.23)$$

При перегляді виразу (3.22) можна помітити, що це проста залежність. Однак проблема проектування виникає через залежність величини навантаження. Ця залежність робить аналізоване рішення системи бездротової передачі електроенергії відмінним для систем з постійними потребами в електроенергії.

3.4 Висновок до третього розділу

Проведений докладний аналіз структури та функцій вторинних випрямлячів в системах бездротової передачі електроенергії підкреслив важливі аспекти їх ефективності. Оптимізація цих систем є важливим напрямком досліджень, спрямованих на підвищення продуктивності та зниження енерговитрат. Представлені різноманітні методи оптимізації, спрямовані на поліпшення ефективності систем бездротової передачі енергії. Досліджені підходи включають в себе технологічні та інженерні рішення, які сприяють оптимальній роботі цих систем.

Огляд принципів роботи випрямляча струму надає уявлення про ключові аспекти, які впливають на ефективність бездротової передачі енергії. Розглянуті основні властивості та вимоги до випрямлячів для оптимального функціонування системи. Висвітлено аналітичний підхід до проектування індукторів, спрямований на забезпечення подвоєння струму з ефективністю та стабільністю. Цей підхід базується на ретельному аналізі та врахуванні ключових параметрів для досягнення оптимальних результатів.

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ РОБОТИ ВТОРИННИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ У СИСТЕМАХ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

У сучасному світі, де висока мобільність та бездротові технології стають невід'ємною частиною нашого повсякденного життя, проблема оптимізації продуктивності систем бездротової передачі енергії набуває надзвичайної важливості. З розширенням застосування безпроводних технологій та зростанням попиту на нові електричні пристрої, які використовують бездротову передачу енергії, удосконалення ефективності цих систем стає критичною задачею.

Споживачі та індустрія активно використовують бездротові системи зарядки для мобільних телефонів, навушників, гаджетів та навіть електромобілів. Однак існуючі технології часто зіштовхуються з втратами енергії та обмеженнями ефективності, що визначає необхідність подальших досліджень для вдосконалення цих систем.

Проблема оптимізації продуктивності систем бездротової передачі енергії стає актуальною у зв'язку з розширенням застосування безпроводних технологій та зростанням попиту на ефективні методи передачі електроенергії. У контексті постійного розвитку бездротових систем зарядки, електричних транспортних засобів та інших пристроїв, що використовують бездротову передачу енергії, оптимізація продуктивності стає стратегічно важливою.

Використання альтернативних конфігурацій випрямлячів може сприяти підвищенню ефективності систем, зниженню втрат енергії та поліпшенню загальної продуктивності. Розробка та впровадження таких інноваційних рішень важливі для створення ефективних, стабільних та сталих систем бездротової передачі енергії, що можуть відповідати зростаючим потребам сучасного суспільства.

Окрім того, вивчення чутливості до навантаження та широкого робочого діапазону дозволяє розуміти поведінку системи в різних умовах використання,

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

що є важливим кроком у створенні універсальних та адаптивних технологічних рішень.

Такий підхід до оптимізації систем бездротової передачі енергії має потенціал впливу на широкий спектр галузей, від побутових пристроїв до промислових систем, сприяючи розвитку стійких та ефективних технологій енергетики майбутнього.

Основною метою цієї роботи є дослідження та оптимізація продуктивності системи бездротової передачі енергії за допомогою впровадження альтернативної конфігурації випрямляча вторинної обмотки. Аналізуючи новаторські підходи до створення більш ефективних систем, робота враховує вимоги до енергоефективності та високої продуктивності в різних умовах експлуатації.

Додатково, зростання використання електричних транспортних засобів і розвиток інших передових технологій, таких як медичні пристрої та індустріальні роботи, підкреслює важливість подальшого вдосконалення систем бездротової передачі енергії для задоволення різноманітних потреб ринку та забезпечення сталого розвитку цих технологій.

Отже, це є важливим кроком у напрямку створення більш ефективних та сталих рішень для бездротової передачі енергії, що має великий потенціал вплинути на багато галузей технологій та відігравати ключову роль у розвитку сучасного суспільства.

4.1 Порівняння ефективності системи бездротової передачі енергії для мостового діодного випрямляча та запропонованої модифікованої схеми

Було проведено порівняння для кількісної оцінки альтернативного випрямляча вторинної сторони. В цьому дослідженні використовувалася широко поширена компенсаційна мережа для передавальної та приймальної сторін (послідовна компенсація). Проаналізована система була порівняна з системою

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

бездротової передачі енергії, що використовує стандартний мостовий діодний випрямляч. Вхідні та вихідні параметри наведені в таблиці 4.1. Параметр U_{1m} відноситься до амплітуди вхідної напруги, U_{2m} – напруги вторинної сторони, необхідної для живлення, f_{sw} – частота комутації перетворювача на первинній стороні, P_n – вихідна потужність, k – коефіцієнт зв'язку, і p – співвідношення між первинною та вторинною стороною.

Таблиця 4.1 – Номінальні параметри вхідних та вихідних значень

U_{1m} , В	U_{2m} , В	f , кГц	P_n , Вт	k	p
$\frac{4}{\pi} 55$	18	577	200	0,5	1

У таблиці 4.2 вказані значення параметрів схеми, де L_1 і L_2 визначають індуктивності первинної та вторинної котушок відповідно, C_1 і C_2 – ємності компенсаційних конденсаторів, R_1 і R_2 – паразитні опори первинної та вторинної котушок відповідно, а R_n представляє опір навантаження.

Таблиця 4.2 – Значення компонентів схеми досліджуваної бездротової системи передачі електроенергії.

$L_1=L_2$, мкГн	$C_1=C_2$, нФ	$R_1=R_2$, мОм	R_n , Ом
5.5	142.12	$90 \cdot 10^{-3}$	1.62

Для перевірки електричної характеристики обох альтернатив було проведено моделювання схеми в часовій області, враховуючи оптимальне значення навантаження. Схеми імітаційних моделей представлені на рисунках 4.1 та 4.2, при цьому інвертор первинної сторони зображено заміною джерела напруги.

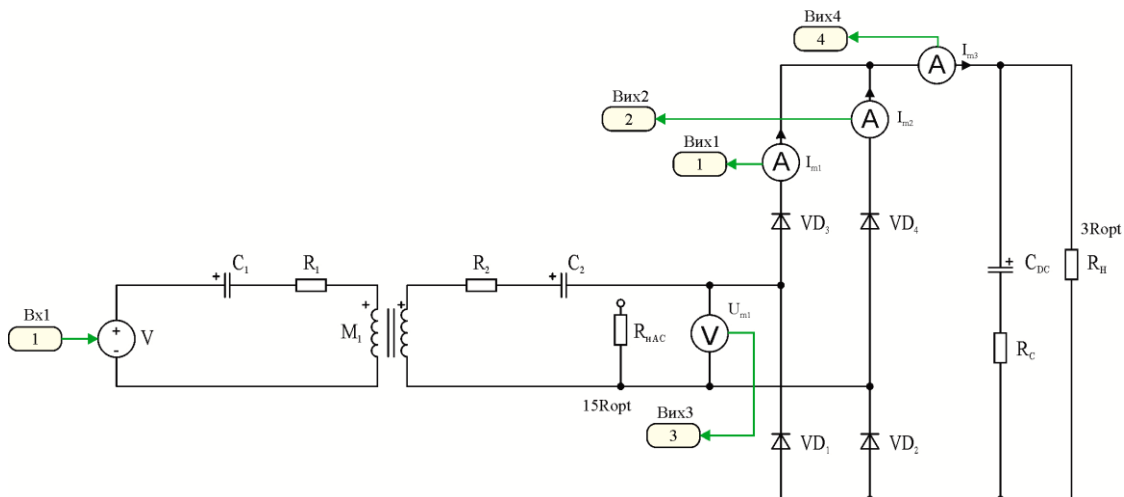


Рисунок 4.1 – Принципова схема імітаційної моделі бездротової системи передачі електроенергії з мостовим діодним випрямлячем

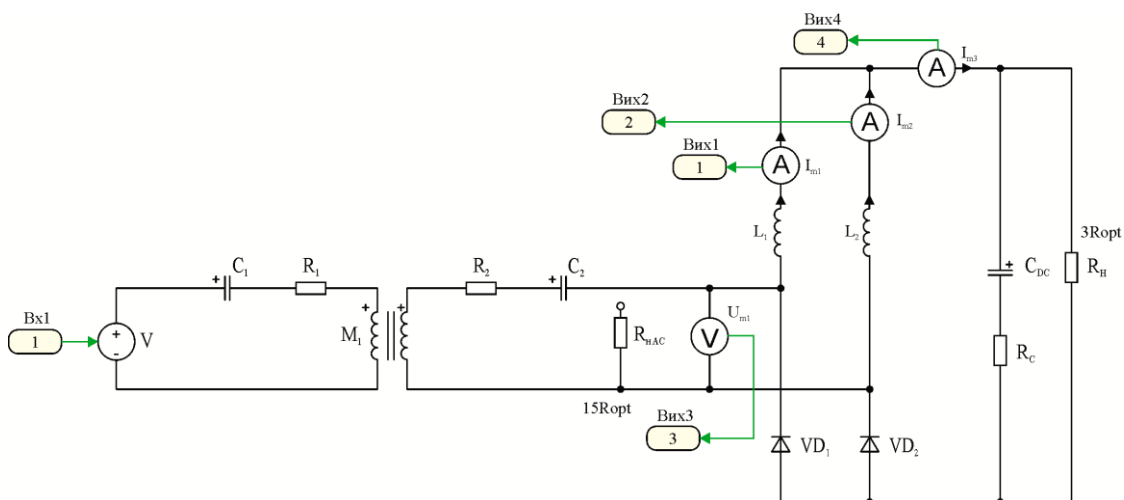


Рисунок 4.2 – Принципова схема імітаційної моделі бездротової системи передачі електроенергії з запропонованою альтернативою, яка враховує оптимальне значення навантаження

Основна увага була спрямована на часові характеристики сигналів струмів, що протікають через окремі гілки випрямляча (I_1 , I_2), струму навантаження, I_H , і напруги вторинної сторони, індукованої на приймальній котушці (U_2). На рисунку 4.3 представлені часові характеристики згаданих змінних для мостового

діодного випрямляча, тоді як на рисунку 4.4 зображено ситуацію для випрямляча з подвійним струмом.

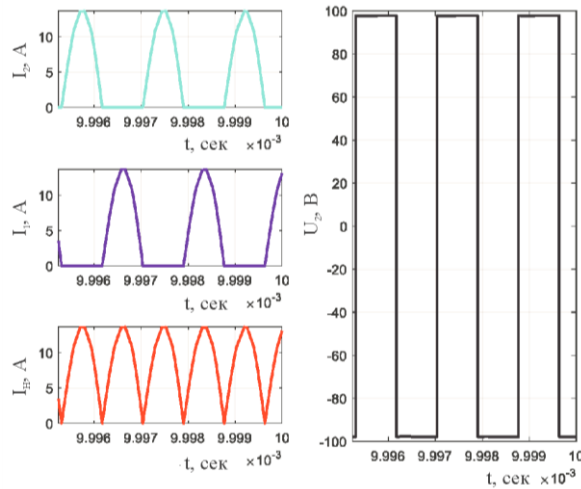


Рисунок 4.3 – Часові графіки обраних електричних параметрів для мостового діодного випрямляча

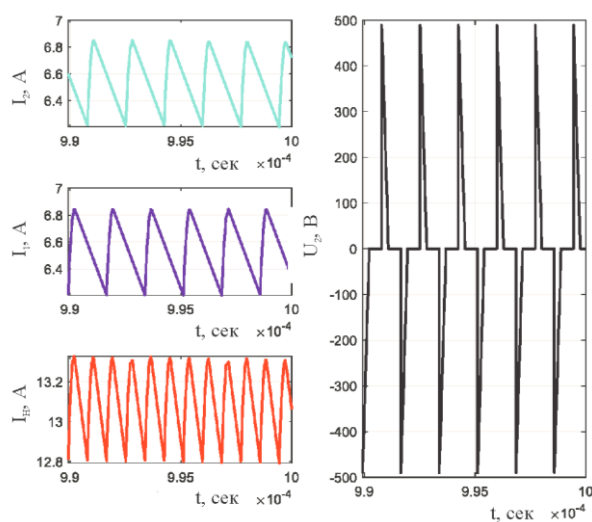


Рисунок 4.4 – Часові графіки обраних електричних параметрів для випрямляча з подвоєнням струму

Щодо результатів системи передачі електроенергії з мостовим діодним випрямлячем, струми I_1 та I_2 формують струм навантаження I_n . Напруга вторинної сторони має прямокутну форму, що відповідає роботі діодного випрямляча напруги.

Осцилограми струмів I_1 і I_2 випрямляча подвоєння струму взаємно зсунуті на 90° . Струм навантаження I_n є сумою обох цих струмів гілок. Коефіцієнт пульсації струму залежить від величини котушок індуктивності, в той час як трикутна форма струмів відображає сильно спотворену форму вторинної напруги U_2 . Це також справедливо для котушки первинної сторони.

Під час комутації діода відзначається екстремальним зростанням напруги, за яким слідує поступове його зниження під час зростання навантаження. Після цього перехідного періоду напруга U_2 практично зближується до нуля (рис. 4.5). Зменшення величини індуктивності випрямляча подвоєння струму може призвести до зменшення максимальних значень напруги U_2 . Однак такий підхід також може призвести до зниження ефективності і передачі потужності.

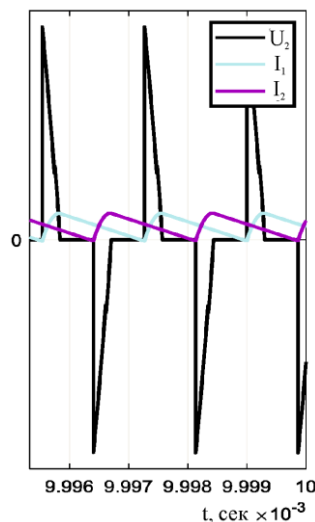


Рисунок 4.5 – Часові графіки обраних електричних параметрів для випрямляча-подвоєння струму

4.2 Проведення експериментальної перевірки та аналіз результатів

На рисунку 4.6 наведено блок-схему процесу налаштування системи під час проведення експериментальних випробувань. Ця схема включає в себе

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

налаштування параметрів, та контроль за електричними величинами для забезпечення оптимального функціонування системи.

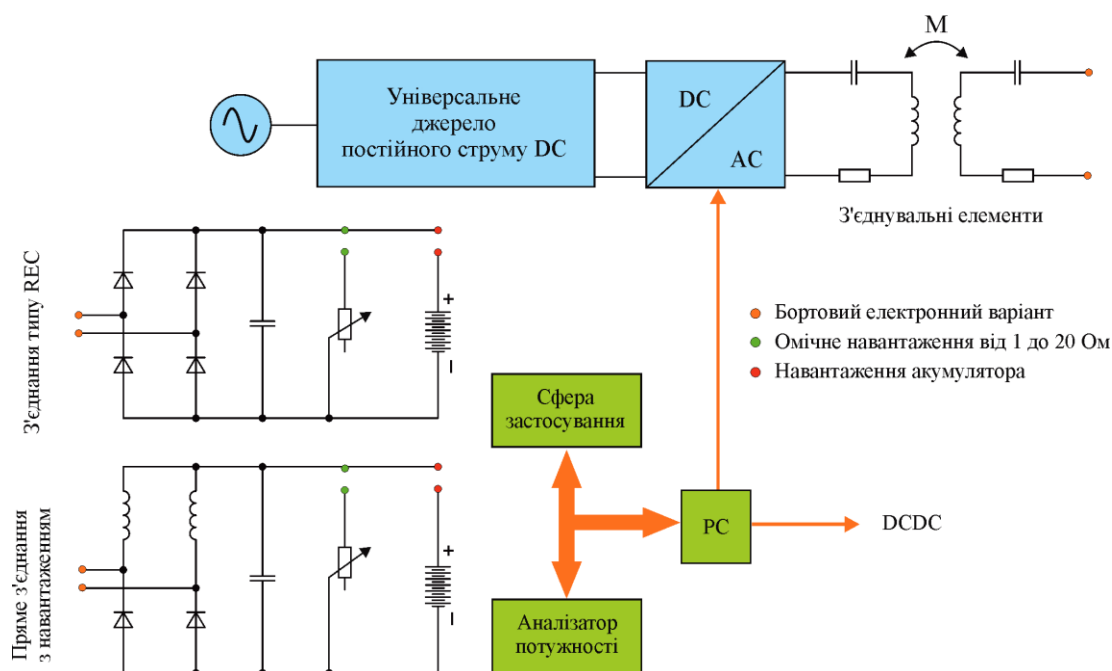


Рисунок 4.6 – Блок-схема досліджуваної установки системи

Діоди верхнього мостового випрямляча були замінені котушками індуктивності, а їхні значення визначаються за допомогою рівняння (3.22). Отже, розмір провідника індуктора пропорційний значенню струму вторинної сторони. Це аранжування випрямляча дозволяє ефективно використовувати індуктивні компоненти для вирівнювання напруги та струму, що сприяє покращенню загальної продуктивності системи передачі електроенергії.

Експериментальна перевірка функціонування системи розпочалася з аналізу часових осцилограм електричних параметрів на обох сторонах передачі. На лівій частині рисунку 4.7 представлені результати для оптимального навантаження, в той час як праворуч показана реальна робота системи під час зарядки акумулятора. Отримані сигнали на рисунку 4.7 відповідають результатам моделювання (див. рисунки 4.3, 4.4, 4.5) щодо значень та форми сигналів

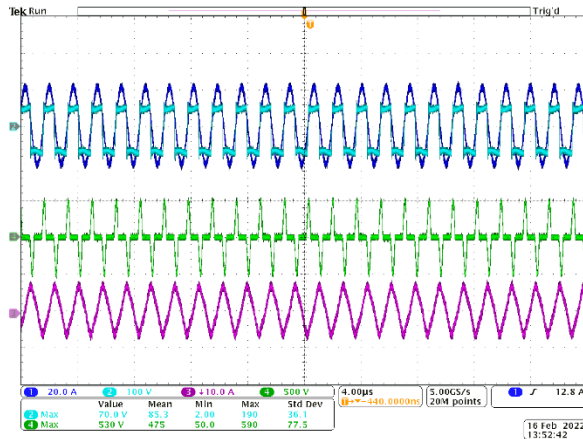


Рисунок 4.7 – Часові форми сигналів бездротової системи передачі електроенергії з випрямлячем-подвійником струму для ідеальної конфігурації

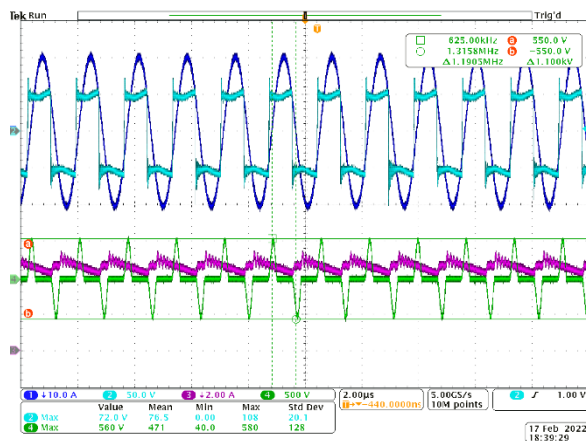


Рисунок 4.8 – Часові форми сигналів бездротової системи передачі електроенергії з випрямлячем-подвійником струму для справжньої програми заряджання батареї

Часові форми сигналів бездротової системи передачі електроенергії з випрямлячем-подвійником струму представлені на рисунках 4.7 та 4.8. На рисунку 4.7 зображено ідеальну конфігурацію, де синій графік відображає первинний струм, а світло-блакитний представляє первинну напругу.

Рисунок 4.8 відображає справжню програму заряджання батареї. Фіолетовий графік на рисунку 4.7 представляє вторинний струм, тоді як

фіолетовий графік на рисунку 4.8 відзначає постійний струм. Зелений графік на обох рисунках вказує вторинну напругу.

Ці графіки ілюструють часові параметри сигналів у двох різних конфігураціях, що дозволяє здійснити порівняння між ідеальною та реальною програмами заряджання батареї [44, 45] в системі передачі електроенергії.

Отже, для здійснення порівняльного аналізу продуктивності системи з урахуванням різних типів випрямлення вторинної сторони необхідно внести певні модифікації параметрів системи. За однакової напруги живлення альтернативний випрямляч із подвійником струму забезпечить значно більшу потужність у порівнянні зі стандартною системою («А»). Існують принаймні три шляхи вирішення цього завдання, які позначені літерами «В», «С» і «D».

Варіант «В» передбачає збереження параметрів схеми, тож для досягнення цього необхідно знизити напругу живлення до значення (3.23) за допомогою (3.11).

Варіант «С» передбачає використання тієї ж самої напруги живлення, що й варіант «А», і, отже, вимагає модифікації вторинного кола. Враховуючи (3.13), достатньо перерахувати вторинну індуктивність згідно з (3.23).

Варіант «D» передбачає розробку повністю нової конструкції системи з еквівалентним навантаженням, яке визначається за допомогою рівняння (3.23).

Результати всіх варіантів порівнюються в таблиці 4.3, де ΔP_{j1} і ΔP_{j2} вказують втрати енергії на обмотках на первинній і вторинній сторонах відповідно.

					КІТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Таблиця 4.3 – Результати експлуатаційних характеристик аналізованої бездротової системи передачі електроенергії

Параметри	“А”	“В”	“С”	“D”
U_{DC} (В)	55	25	50	58
L_1 (мкГн)	5.5	5.5	5.5	13.323
L_2 (мкГн)	5.5	5.5	27.14	13.323
$L_3_L_4$ (мкГн)	N/A	0.97	0.97	0.97
C_1 (нФ)	142.12	142.12	142.12	58.68
C_2 (нФ)	142.12	142.12	28.8	58.68
C_e (нФ)	N/A	162	162	162
R_1 (МОм)	90	90	90	90
R_2 (МОм)	90	90	90	90
ΔP_{j1} (Вт)	3	18.17	3.37	5
ΔP_{j2} (Вт)	13.77	2.5	4.63	4
P_Z (Вт)	204.85	201.9	199	205
η (%)	92.27	87	96	91.7

Як видно з отриманих результатів, варіант "В" виявився менш ефективним. Це пояснюється нижчою напругою порівняно з іншими варіантами, що призводить до більших втрат через збільшений струм на первинній стороні. Проте варто відзначити, що передача втрат із вторинної сторони на первинну може виявитися корисною у випадку водонепроникної конструкції зарядного пристрою. Варіант "D" виявляється оптимальним з точки зору загальної ефективності, подібно до варіанту "А". Однак через використання іншого типу випрямляча він демонструє менше загальне гармонійне спотворення, що призводить до зменшення повної потужності. Це сприяє зниженню втрат потужності в первинній обмотці і надає вагому перевагу з точки зору теплового

керування. З іншого боку, варіант "В" вирізняється найкращою ефективністю серед усіх розглянутих варіантів.

Оскільки робота бездротової системи передачі електроенергії не є сталою для одного конкретного значення навантаження, був проведений аналіз чутливості варіантів «А» і «С» до змін величини навантаження. Цей підхід є ключовим фактором, який визначатиме вибір відповідної топології для конструкції бездротового зарядного пристрою електроенергії.

З результатів (таблиця 4.4) видно, що варіант «А» досяг максимальної ефективності для значення $2R_n$, і можна спостерігати сталий темп зниження ефективності вище точки роботи $2R_n$. Причина того, що варіант «А» досяг максимальної ефективності для різних станів, а не для номінального, полягає в тому, що еквівалентне навантаження не має достатньо великого значення відповідно до (3.23).

$$\eta_{\max(s-s)} \approx 1 - \frac{2R_1 \sqrt{\omega^2 M^2}}{\omega^2 M^2} \approx 1 - \frac{2R_1}{\sqrt{\omega^2 M^2}} \approx 1 - \frac{2}{k \sqrt{Q_1 Q_2}} \quad (4.1)$$

$$R_{n-var.(s-s)} \approx k\omega L$$

$$R_n \geq R_{n-var.(s-s)}$$

Отже, можливою перевагою альтернативної топології випрямляча може бути надання умови (4.1) для спрощення виконання.

Експериментальні результати моделювання підкреслюється графічним представленням результатів на рисунку 4.9 для таблиці 4.3 та на рисунку 4.10 для таблиці 4.4. Це графічне відображення демонструє задовільні результати дослідження.

Таблиця 4.4 –Результати експлуатаційних характеристик аналізованої бездротової системи передачі електроенергії

	Параметри	R_n	$2R_n$	$3R_n$	$4R_n$	$5R_n$
Варіант «А»	P_z (Вт)	204.85	394.14	562.22	703.6	834.42
	η (%)	92.27	94.11	93.8	92.68	92.18
Варіант «С»	P_z (Вт)	199	380	471.75	517.52	551.21
	η (%)	96	95.61	94.87	94.23	93.56

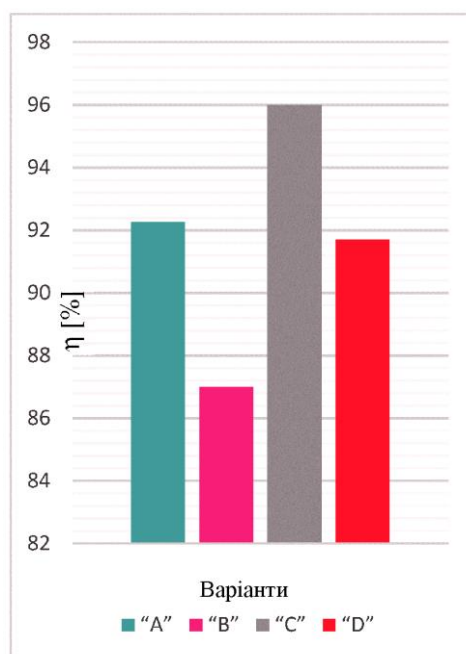


Рисунок 4.9 – Результати експлуатаційних характеристик аналізованої бездротової системи передачі електроенергії – усі варіанти в оптимальному стані системи

На початковому етапі запропонованого альтернативного випрямляча І-типу використовується лише два діода і дві високоякісні котушки індуктивності без взаємного зв'язку, що вказує на очікувані менші втрати потужності випрямляча. Це явище підтверджується на рисунку 4.9, де відображена

ефективність системи при оптимальному навантаженні. Таким чином, запропоноване рішення є вигідним не лише через цей аспект.

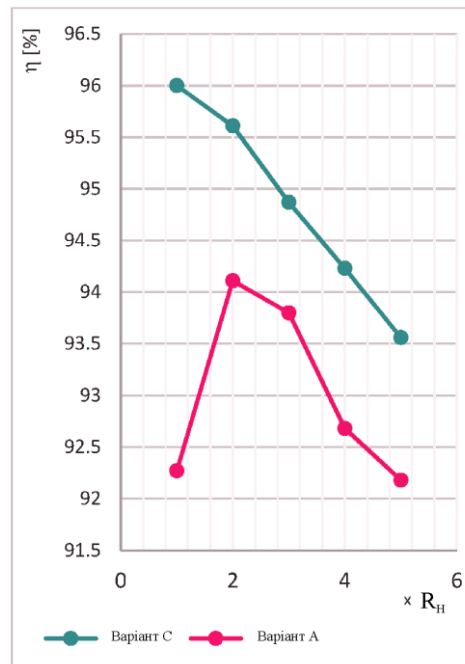


Рисунок 4.10 – Результати експлуатаційних характеристик досліджуваної бездротової системи передачі електроенергії – варіант А і варіант С за змінних значень навантаження

Згідно з конструкцією, запропоноване рішення виявляється більш доступним і компактним у порівнянні зі стандартним діодним випрямлячем, особливо у порівнянні з активними схемами узгодження імпедансу, та, у деяких випадках, пасивним узгодженням імпедансу навантаження для бездротової передачі енергії. Крім того, в порівнянні з альтернативними активними схемами, запропоноване рішення є меншим за розміром та більш ефективним у реальних умовах експлуатації, зокрема при різних значеннях навантаження. На рисунку 4.10 показана ефективність системи в реальних умовах, вказуючи на переваги запропонованого рішення в забезпеченні високої продуктивності при низьких витратах, компактних розмірах і мінімальних ускладненнях.

4.3 Висновок до четвертого розділу

У даного розділу можна зазначити, що розглянуті альтернативні топології випрямляча для бездротової системи передачі електроенергії демонструють значні переваги в порівнянні зі стандартними схемами. Альтернативний випрямляч І-типу, який використовує два діода та дві високоякісні котушки індуктивності без взаємного зв'язку, очікується мати менші втрати потужності, що підтверджено ефективністю системи в оптимальних умовах навантаження.

Крім того, варто відзначити, що запропонована альтернативна топологія випрямляча виявляється економічно вигідною та компактною. Вона демонструє переваги, що робить її привабливим вибором для бездротових систем передачі енергії з врахуванням витрат, розміру та ефективності.

					КІТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

ВИСНОВКИ

У даному кваліфікаційному проекті виконано системний аналіз бездротової системи передачі електроенергії, що оснащена альтернативним рішенням випрямляча вторинної сторони. Встановлено, що запропоноване рішення є вірним вибором для застосувань, де присутнє низьке еквівалентне навантаження.

Застосовано аналітичний підхід для знаходження оптимального значення індуктивності подвоєння струму вторинної сторони, щоб досягти максимально можливого коефіцієнта корисної дії в умовах системи. Під час аналізу розглянуто ряд взаємозв'язків, що полегшило розуміння процесу проектування бездротових систем передачі електроенергії з використанням альтернативної топології випрямляча вторинної сторони для фахівців у галузі телекомунікацій.

Експериментальна перевірка експлуатаційних характеристик проведена за допомогою моделювання, а запропоноване рішення адаптовано для досягнення необхідних параметрів входу-виходу загальноживаних систем, обладнаних стандартним мостовим випрямлячем напруги. Результати експериментів свідчать про підвищення ефективності роботи випрямляча подвоєння струму порівняно з мостовим випрямлячем на 3,73 % (мостовий випрямляч – 92,27 %, випрямляч подвоєння струму – 96 %). У другому експерименті аналізовано чутливість до зміни навантаження, де виявлено вищу ефективність запропонованого рішення у всьому робочому діапазоні порівняно зі стандартним рішенням. Зазначено, що для конкретних застосувань, де присутні низькі еквівалентні навантаження, запропоноване рішення є привабливою альтернативою.

Майбутні дослідження будуть акцентуватися на оцінці електромагнітної сумісності запропонованого альтернативного випрямляча вторинної сторони бездротової системи передачі електроенергії. Це обумовлено тим, що в роботі виявлено значне підвищення напруги порівняно зі стандартними рішеннями випрямлячів, і, отже, зв'язок між параметрами схеми (дроселями подвоєння струму) і можливостями зниження напруги вимагає більш докладного розгляду.

					КПТР.2021025.02.05	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи теорії кіл : підруч. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Радіотехніка» / [Ю. О. Коваль, Л. В. Гринченко, І. О. Милютченко, О. І. Рибін ; за заг. ред. В. М. Шокала, В. І. Правди]. – Харків : Компанія СМІТ, 2008. – Ч. 1. – 432 с.
2. Теоретичні основи електротехніки: підручник / В.С.Хілов. – Д.: Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, 433 с. 2021 рік.
3. Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник / В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков та ін. — 2-ге вид., допов. і переробл. — К.: Вища шк., 2004. — 366 с.
4. Промислова електроніка. Теорія і практикум. Підручник. 3-тє вид. Затверд. МОН України. Сосков А.Г., Ко-лонтаєвський Ю.П. 496 стор. 2021 р.
5. Sample, A.P.; Yeager, D.J.; Powledge, P.S.; Mamishev, A.V.; Smith, J.R. Design of an RFID-Based Battery-Free Programmable Sensing Platform. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2008, 57, 2608–2615.
6. Ullah, M.A.; Keshavarz, R.; Abolhasan, M.; Lipman, J.; Esselle, K.P.; Shariati, N. A Review on Antenna Technologies for Ambient RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer: Designs, Challenges and Applications. IEEE Access 2022, 10, 17231–17267.
7. Ishino, S.; Takano, I.; Yano, K.; Shinohara, N. Frequency-division techniques for microwave power transfer and wireless communication system with closed waveguide. In Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Aveiro, Portugal, 5–6 May 2016; pp. 1–4.
8. Putra, A.W.S.; Kato, H.; Maruyama, T. Hybrid Optical Wireless Power and Data Transmission System. In Proceedings of the IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), Seoul, Republic of Korea, 15–19 November 2020; pp. 374–376.

					КІТП.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

9. So, E.; Yeon, P.; Chichilnisky, E.J.; Arbabian, A. An RF-Ultrasound Relay for Adaptive Wireless Powering Across Tissue Interfaces. *IEEE J. Solid-State Circuits* 2022, 57, 3429–3441.

10. Agarwal K., Jegadeesan R., Guo Y.X., Thakor N.V. Wireless Power Transfer Strategies for Implantable Bioelectronics. *IEEE Rev. Biomed. Eng.* 2017;10:136–161.

11. Wireless Power Consortium . Qi Specification Power Delivery. Wireless Power Consortium; Piscataway, NJ, USA: 2021. V1.3. [Google Scholar]

12. Wireless Power Transfer Airfuel Alliance Resonant Baseline System Specification (BSS) International Organization for Standardization; Geneva, Switzerland: 2017. [Google Scholar]

13. Raab F., Asbeck P., Cripps S., Kenington P., Popovic Z., Pothecary N., Sevic J., Sokal N. Power amplifiers and transmitters for RF and microwave. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2002;50:814–826. doi: 10.1109/22.989965.

14. Microsemi P. Gallium Nitride (GaN) Versus Silicon Carbide (SiC) In the High Frequency (RF) and Power Switching Applications. Digikey; Thief River Falls, MN, USA: 2014.

15. Schuylenbergh K., Puers R., editors. Inductive Powering. Springer; Dordrecht, The Netherlands: 2009. Analog Circuits and Signal Processing.

16. Mai R., Liu Y., Li Y., Yue P., Cao G., He Z. An Active-Rectifier-Based Maximum Efficiency Tracking Method Using an Additional Measurement Coil for Wireless Power Transfer. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018;33:716–728. doi: 10.1109/TPEL.2017.2665040.

17. Cochran S., Costinett D. Frequency Synchronization and Control for a 6.78 MHz WPT Active Rectifier; Proceedings of the 2018 IEEE 19th Workshop on COMPEL; Padua, Italy. 25–28 June 2018; pp. 1–7.

18. Colak K., Asa E., Bojarski M., Czarkowski D., Onar O.C. A Novel Phase-Shift Control of Semibridgeless Active Rectifier for Wireless Power Transfer. *IEEE Trans. Power Electron.* 2015;30:6288–6297.

19. Ahn D., Hong S. A Study on Magnetic Field Repeater in Wireless Power Transfer. IEEE Trans. Ind. Electron. 2013;60:360–371.

20. Rindorf L., Lading L., Breinbjerg O. Resonantly coupled antennas for passive sensors; Proceedings of the 2008 IEEE Sensors; Lecce, Italy. 26–29 October 2008; pp. 1611–1614.

21. Baker M.W., Sarpeshkar R. Feedback Analysis and Design of RF Power Links for Low-Power Bionic Systems. IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst. 2007;1:28–38. doi: 10.1109/TBCAS.2007.893180.

22. Microsemi P. Gallium Nitride (GaN) Versus Silicon Carbide (SiC) In the High Frequency (RF) and Power Switching Applications. Digikey; Thief River Falls, MN, USA: 2014.

23. Mai R., Liu Y., Li Y., Yue P., Cao G., He Z. An Active-Rectifier-Based Maximum Efficiency Tracking Method Using an Additional Measurement Coil for Wireless Power Transfer. IEEE Trans. Power Electron. 2018;33:716–728.

24. Cochran S., Costinett D. Frequency Synchronization and Control for a 6.78 MHz WPT Active Rectifier; Proceedings of the 2018 IEEE 19th Workshop on COMPEL; Padua, Italy. 25–28 June 2018; pp. 1–7.

25. Colak K., Asa E., Bojarski M., Czarkowski D., Onar O.C. A Novel Phase-Shift Control of Semibridgeless Active Rectifier for Wireless Power Transfer. IEEE Trans. Power Electron. 2015;30:6288–6297.

26. Ahn D., Hong S. A Study on Magnetic Field Repeater in Wireless Power Transfer. IEEE Trans. Ind. Electron. 2013;60:360–371.

27. Rindorf L., Lading L., Breinbjerg O. Resonantly coupled antennas for passive sensors; Proceedings of the 2008 IEEE Sensors; Lecce, Italy. 26–29 October 2008; pp. 1611–1614.

28. Baker M.W., Sarpeshkar R. Feedback Analysis and Design of RF Power Links for Low-Power Bionic Systems. IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst. 2007;1:28–38.

29. Challa V.R., Mur-Miranda J.O., Arnold D.P. Wireless power transmission to an electromechanical receiver using low-frequency magnetic fields. *Smart Mater. Struct.* 2012;21:115017.

30. Mur-Miranda J.O., Cheng S., Arnold D.P. Improving the efficiency of electrodynamic wireless power transmission; Proceedings of the 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP); Gothenburg, Sweden. 8–12 April 2013; pp. 2848–2852

31. Lecluyse C., Minnaert B., Kleemann M. A Review of the Current State of Technology of Capacitive Wireless Power Transfer. *Energies.* 2021;14:5862.

32. Lu F., Zhang H., Mi C. A Review on the Recent Development of Capacitive Wireless Power Transfer Technology. *Energies.* 2017;10:1752.

33. Zhang H., Lu F., Hofmann H., Liu W., Mi C. A 4-Plate Compact Capacitive Coupler Design and Compensated Topology for Capacitive Power Transfer in Electric Vehicle Charging Applications. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016;31:8541–8551.

34. Lu F., Zhang H., Mi C. A Two-Plate Capacitive Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Charging Applications. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018;33:964–969.

35. Komaru T., Akita H. Positional characteristics of capacitive power transfer as a resonance coupling system; Proceedings of the 2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT); Perugia, Italy. 15–16 May 2013; pp. 218–221

36. Zhang H., Lu F., Hofmann H., Liu W., Mi C.C. Six-Plate Capacitive Coupler to Reduce Electric Field Emission in Large Air-Gap Capacitive Power Transfer. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018;33:665–675.

37. Muharam A., Ahmad S., Hattori R. Scaling-Factor and Design Guidelines for Shielded-Capacitive Power Transfer. *Energies.* 2020;13:4240.

38. Muharam A., Ahmad S., Hattori R., Hapid A. 13.56 MHz Scalable Shielded-Capacitive Power Transfer for Electric Vehicle Wireless Charging; Proceedings of the 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW); Seoul, Korea. 15–19 November 2020; pp. 298–303.

					КІІТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

39. Ahmad S., Hattori R., Muharam A. Generalized Circuit Model of Shielded Capacitive Power Transfer. *Energies*. 2021;14:2826.
40. Jiang C., Chau K.T., Liu C., Lee C.H.T. An Overview of Resonant Circuits for Wireless Power Transfer. *Energies*. 2017;10:894.
41. Dai J., Ludois D.C. Single Active Switch Power Electronics for Kilowatt Scale Capacitive Power Transfer. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron*. 2015;3:315–323.
42. Aldhaher S., Luk P.C.K., Bati A., Whidborne J.F. Wireless Power Transfer Using Class E Inverter With Saturable DC-Feed Inductor. *IEEE Trans. Ind. Appl*. 2014;50:2710–2718. doi: 10.1109/TIA.2014.2300200.
43. Rozario D., Azeez N.A., Williamson S.S. Analysis and design of coupling capacitors for contactless capacitive power transfer systems; Proceedings of the 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2016; Dearborn, MI, USA. 27–29 June 2016.
44. Boiko J., Kałaczyński T. Diagnostics, measurement and control of electrical parameters supercapacitors //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – T. 351. – C. 01031.
45. Martynyuk V. et al. Diagnostics of Solar Cells //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – T. 302. – C. 01013.

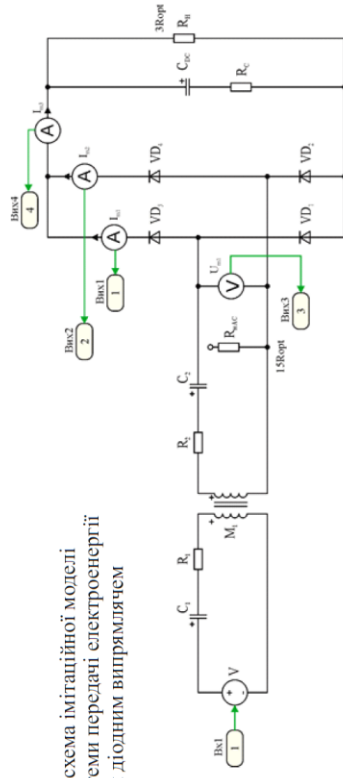
					КІІТР.2021025.02.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

ДОДАТКИ

Додаток Б

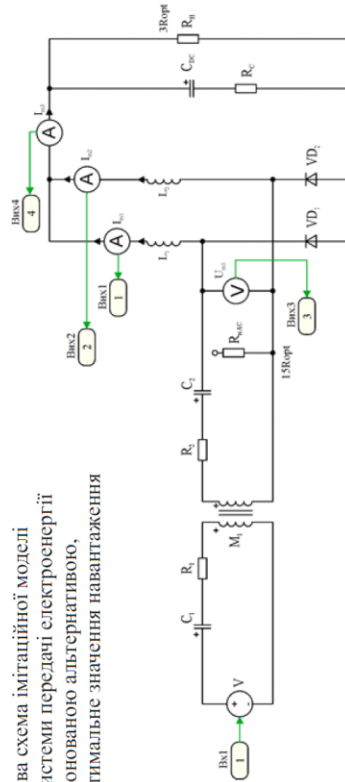
Принципові схеми імітаційної моделі системи бездротової передачі енергії

КПТР.2021025.02.05 E8



Принципова схема імітаційної моделі бездротової системи передачі електроенергії з мостовим діодним випрямлячем

Принципова схема імітаційної моделі бездротової системи передачі електроенергії із запропонованою альтернативою, яка враховує оптимальне значення навантаження



КПТР.2021025.02.05 E8			
Зм.	Лист	Підпис	Дата
Розроб.	Горчица О.В.		
Перевір.	Бойко Ю.М.		
Н. контр.	Підоленко С.К.		
Затв.			
Принципові схеми імітаційної моделі бездротової системи передачі електроенергії			
ХНУ, гр. ТР2с-21-1			

Додаток В

Схема Часові характеристики змінних для мостового діодного випрямляча

<p>КПТР.2021025.02.05 E8</p>	<p>Часові графіки обраних електричних параметрів для мостового діодного випрямляча</p>	<p>Часові графіки обраних електричних параметрів для випрямляча з подвоєнням струму</p>	<p>Часові графіки обраних електричних параметрів для випрямляча-подвоєння струму</p>
<p>Зм. Лист</p>	<p>№ докум.</p>	<p>Підпис</p>	<p>Дата</p>
<p>Розроб. Перевір.</p>	<p>Горчиця О.В. Бойко Ю.М.</p>	<p></p>	<p></p>
<p>Н. контр. Затв.</p>	<p>Підченко С.К.</p>	<p></p>	<p></p>
<p>КПТР.2021025.02.05 E8</p>			<p>Часові характеристики змінних для мостового діодного випрямляча</p>
<p>ХНУ, гр. ТР2с-21-1</p>			<p></p>

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій
д.т.н., доценту ПІДЧЕНКУ Сергію
здобувача вищої освіти
ГОРЧИЦІ Олександра
ФІТ, гр. ТРС-21-1

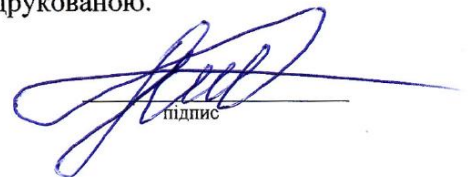
ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (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.

25 травня 2024 р.
дата


підпис

Имя пользователя:
Kafedra TMIT KhNU

ID проверки:
1016328493

Дата проверки:
06.06.2024 17:18:27 EEST

Тип проверки:
Doc vs Internet + Library

Дата отчета:
07.06.2024 08:58:22 EEST

ID пользователя:
100005657

Название файла: Горчица_TP2с-21-1

Количество страниц: 74 Количество слов: 13741 Количество символов: 107379 Размер файла: 2.13 MB ID файла: 10161278

11.8% Совпадения

Наибольшее совпадение: 5.92% с Интернет-источником (https://mdpi-res.com/d_attachment/sensors/sensors-22-05573...)

9.9% Источники из Интернета 717 Страница 76

3.45% Источники из Библиотеки 138 Страница 80

0.6% Цитат

Цитаты 5 Страница 81

Не найдено ни одной ссылки

0% Исключений

Нет исключенных источников

Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 36

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 10%

ID: 128039 Назва: Система бездротової передачі енергії Додано в БД: 2024-06-02 Автора: Горчиця Олександр Вадимович Керівники: Бойко Юлій Миколайович Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	75006	1150	776 (1%)	13 (1%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РІШЕННЯ

кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ ДО ЗАХИСТУ

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

Назва: Система бездротової передачі енергії

Автор: Горчиця Олександр Вадимович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: д.т.н., професор Бойко Юлій Миколайович

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.	-
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	відповідає
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: Виявленні запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), складають 11.8% та мають посилання на приведенний список літературних джерел.

«07» червня 2024 р.

Науковий керівник

Завідувач кафедру ТМІТ

Члени комісії:



Юлій БОЙКО

Сергій ПІДЧЕНКО

Олександр ПИЩОРАР

ВІДГУК

на кваліфікаційний проект
студента групи ТР2с-21-1 Олександра ГОРЧИЦІ
«Система бездротової передачі енергії»

Кваліфікаційний проект, присвячений оптимізації продуктивності системи бездротової передачі енергії, представляє собою детальне та інноваційне дослідження в галузі електроенергетики. Робота зосереджена на використанні альтернативної конфігурації випрямляча вторинної обмотки з діодним випрямлячем із подвійним струмовим подвоєнням, що забезпечує заміщення діодів котушками індуктивності.

Основні переваги запропонованого рішення чітко визначені в роботі, зокрема, висока ефективність роботи системи при номінальній потужності. Автор докладно проаналізував електричну поведінку системи, визначивши оптимальні умови та провівши проектування відповідних котушок індуктивності.

Змодельована перевірка та порівняння із іншими альтернативами вторинного випрямлення обґрунтовано проведеними аналізами чутливості до навантаження. Результати дослідження свідчать про високий потенціал запропонованого рішення у плані ефективності роботи системи бездротової передачі електроенергії.

Загальною висновок з цієї роботи визнають вагомим внеском у розвиток технології бездротової передачі електроенергії та поглиблення розуміння використання новаторських концепцій вторинного випрямлення. Автор продемонстрував високий рівень знань та вмінь у галузі, а також виявив творчий підхід до вирішення складних проблем.

У процесі виконання кваліфікаційного проекту Олександр ГОРЧИЦЯ проявив креативність, ініціативність, старанність, наполегливість, здатність та вміння застосовувати набуті знання для вирішення складних завдань, обізнаність у сучасних системних та інформаційних технологіях.

Кваліфікаційний проект виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних телекомунікацій, а студент Олександр ГОРЧИЦЯ заслуговує оцінки «відмінно».

Керівник:
д-р техн. наук, професор



Юлій БОЙКО

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Дипломник: Горчиця Олександр Вадимович

Тема роботи: Система бездротової передачі енергії

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційного проекту

Кількість листів креслень 4 Кількість сторінок записки 70

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Кваліфікаційний проект присвячений оптимізації системи бездротової передачі енергії через новаторську конфігурацію випрямляча вторинної обмотки, зокрема діодного випрямляча із подвійним струмовим подвоєнням. Проведено аналіз електричної поведінки та визначено оптимальні умови ефективності при номінальній потужності. Розроблено відповідні котушки індуктивності та порівняно запропоноване рішення з альтернативами вторинного випрямлення. Здійснено аналіз чутливості до навантаження, виявивши перспективність запропонованого підходу для високоефективної роботи системи бездротового передачі електроенергії.

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

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: Кваліфікаційний проект демонструє високий рівень досліджень та оптимізації системи бездротової передачі енергії. Автор детально розглядає альтернативну конфігурацію випрямляча вторинної обмотки, що включає діодний випрямляч із подвійним струмовим подвоєнням. Кожен розділ роботи відзначається чітким аналізом електричної поведінки системи та вивченням оптимальних умов ефективності при номінальній потужності. Змодельована перевірка ефективності та порівняння з іншими альтернативами вторинного випрямлення підтверджують високу продуктивність запропонованого рішення. Аналіз чутливості до навантаження дозволяє визначити поведінку системи в широкому робочому діапазоні

4. Позитивні сторони роботи: Робота присвячена глибокому аналізу та оптимізації системи бездротової передачі енергії, що вказує на високий рівень

технічного розуміння автора. Запропонована альтернативна конфігурація випрямляча вторинної обмотки, що включає діодний випрямляч із подвійним струмовим подвосенням, демонструє новаторський підхід до розв'язання проблеми. Використання змодельованої перевірки та порівняння з іншими альтернативами дозволяє об'єктивно оцінити ефективність запропонованого рішення. Проведений аналіз чутливості до навантаження додає роботі додатковий рівень деталізації та практичного застосування. Усі ці фактори роблять дипломну роботу цікавою, ретельною та важливою для відомства та галузі

5. Негативні сторони роботи: Робота схильна до теоретичного підходу та моделювання. Відсутність практичного підтвердження або експериментальних даних може створити певні обмеження у визначенні реальності запропонованих рішень. 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 дипломна робота виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій. Результати дослідження мають важливе практичне застосування та внесуть вагомий внесок у розвиток систем бездротової передачі енергії.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка дипломної роботи: Дипломна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки відмінно (5.00/А), а її автору Горчиці Олександр, присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

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

«3» червня 2024р.


підпис