

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другого (магістерського) рівня

Освітній рівень

ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 17 Електроніка та телекомунікації
Шифр і назва галузі

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Шифр і назва спеціальності

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

на тему «Метод підвищення ефективності передачі енергії у системах з магнітно-резонансним зв'язком»

ДРЕКР. 023161.01.04 ПЗ

Виконав:
здубувач 2 курсу, група ТРм-23-1


підпис

Максим КРИЖОВИЙ
Ініціали, прізвище

Керівник: к. техн. наук, доцент


підпис

Віктор МІШАН
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

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


підпис

Сергій ПІДЧЕНКО
Ініціали, прізвище

«09» грудня 2024р.

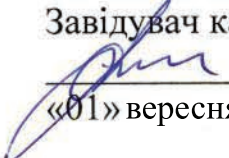
Хмельницький, 2024

Хмельницький національний університет

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ТМІТ

 Сергій ПІДЧЕНКО

«01» вересня 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУКРИЖОВОМУ Максиму Володимировичу

1 Тема роботи: «Метод підвищення ефективності передачі енергії у системах з магнітно-резонансним зв'язком»

керівник роботи: МІШАН Віктор Володимирович, к. техн. наук, доцент

Затверджено наказом по університету від «26» серпня 2024 р. № 60

2 Строк подання здобувачем проекту на кафедру _____

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: підвищення ефективності магнітно-резонансних систем бездротової передачі енергії шляхом розробки та оптимізації трифазної системи.

Об'єкт дослідження: процес бездротової передачі енергії за допомогою магнітного резонансу

Предмет дослідження: трифазна система бездротової передачі енергії, конструкція котушок зв'язку та резонансні компенсційні мережі

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

1. Основи та розвиток магнітного резонансу для бездротової передачі енергії.
2. Аналіз трифазних магнітно-резонансних систем бездротової передачі енергії для високопотужних застосувань.
3. Проектування та моделювання системи з покращеними характеристиками.
4. Експериментальні дослідження та моделювання ефективності магнітно-резонансних систем передачі енергії

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

6 Консультанти розділів дипломної роботи

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

7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на дипломну роботу	07.09.2024р.	<i>виконано</i>
2.	Складання індивідуального плану на дипломну роботу	15.09.2024р.	<i>виконано</i>
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	20.10.2024р.	<i>виконано</i>
4.	Написання другого розділу	05.11.2024р.	<i>виконано</i>
5.	Написання третього розділу	20.11.2024р.	<i>виконано</i>
6.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до дипломну роботу	22.11.2024р.	<i>виконано</i>
7.	Формулювання висновків до роботи	23.11.2024р.	<i>виконано</i>
8.	Підготовка матеріалів для апробації	23.11.2024р.	<i>виконано</i>
9.	Оформлення пояснювальної записки до ДР	26.11.2024р.	<i>виконано</i>

Здобувач

Керівник роботи


(підпис, дата)


(підпис, дата)

Максим КРИЖОВИЙВіктор МІЩАН

АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи: «Метод підвищення ефективності передачі енергії у системах з магнітно-резонансним зв'язком»

Автор роботи: КРИЖОВИЙ Максим Володимирович

Керівник роботи: к. техн. наук, доцент МІШАН Віктор Володимирович.

Пояснювальна записка: 80 сторінок, 17 рисунків, 4 таблиць, 40 джерел.

Графічна частина: 15 презентаційних слайдів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МАГНІТНИЙ ЗВ'ЯЗОК, МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНА ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ, ТРИФАЗНА СИСТЕМА, ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ, РЕЗОНАНСНА ЧАСТОТА, КОМПЕНСАЦІЙНА МЕРЕЖА, КОНСТРУКЦІЯ КОТУШКИ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Метою дипломної роботи є підвищення ефективності магнітно-резонансних систем бездротової передачі енергії шляхом розробки та оптимізації трифазної системи.

Об'єктом дослідження є процес бездротової передачі енергії за допомогою магнітного резонансу.

Предметом дослідження є трифазна система бездротової передачі енергії, зокрема її топологія, конструкція котушок зв'язку та резонансні компенсаційні мережі.

У дипломній роботі розглядається моделювання та оптимізація трифазної системи бездротової передачі енергії, яка вирішує проблеми низької потужності, низької ефективності передачі та високих навантажень, характерних для однофазних систем. Представлено багатofізичну модель, проаналізовано топологію трифазної резонансної компенсаційної мережі та конструкцію котушки зв'язку. Результати моделювання та експериментальні дослідження підтвердили значне підвищення ефективності передачі енергії, зменшення втрат магнітного потоку та напруги в контурі.

ЗМІСТ

	С.
ЗМІСТ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 ОСНОВИ ТА РОЗВИТОК МАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ	12
1.1 Історичний огляд магнітного резонансу для бездротової передачі енергії	12
1.2 Деякі ранні дослідження Тесли у сфері магнітного резонансу.....	13
1.3 Огляд основних принципів магнітно-резонансного зв'язку	17
1.4 Аналіз проблем, пов'язаних із втратами енергії та низькою ефективністю	19
1.5 Огляд сучасних підходів і технологій оптимізації систем передачі енергії	22
1.6 Висновок до першого розділу	26
2 АНАЛІЗ ТРИФАЗНИХ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНИХ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВИСОКОПОТУЖНИХ ЗАСТОСУВАНЬ.....	27
2.1 Огляд сучасних досліджень бездротових систем передачі енергії .	27
2.2 Аналіз використання магнітно-резонансних схем	31
2.3 Топології в системах бездротової передачі енергії.....	33
2.4 Основна та гібридна топології компенсації	34
2.5 Огляд різних систем бездротової передачі енергії на основі топології та типу застосування	38
2.6 Висновок до другого розділу.....	43
3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ З ПОКРАЩЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	44
3.1 Математичний аналіз коефіцієнта магнітного зв'язку в бездротових системах передачі енергії	44

3.2 Математичний аналіз однофазних і трифазних систем бездротової передачі енергії.....	47
3.3 Аналіз та опис запропонованої трифазної бездротової системи передачі енергії.....	49
3.4 Висновок до третього розділу	56
4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ.....	57
4.1 Аналіз магнітного поля та ефективності трифазної котушки методом моделювання	57
4.2 Метод моделювання трифазної котушки	61
4.3 Моделювання в програмному забезпеченні Simulink.....	70
4.7 Висновок до четвертого розділу	78
ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	81
ДОДАТКИ.....	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

WPT	–	Бездротова передача енергії (Wireless Power Transfer)
MR	–	Магнітний резонанс (Magnetic Resonance)
MSR	–	Магнітно-резонансний зв'язок (Magnetic Resonance Coupling)
LCC	–	Конденсаторно-індуктивна компенсація (LC Compensation)
LCL	–	Індуктивно-конденсаторно-індуктивна компенсація (LCL Compensation)
PFC	–	Компенсація коефіцієнта потужності (Power Factor Compensation)
PWM	–	Широтно-імпульсна модуляція (Pulse Width Modulation)
Simulink	–	Програмне забезпечення для моделювання (Simulation and Link)
THD	–	Загальний гармонічний спотворений коефіцієнт (Total Harmonic Distortion)
EMI	–	Електромагнітні перешкоди (Electromagnetic Interference)
AC	–	Змінний струм (Alternating Current)
DC	–	Постійний струм (Direct Current)

ВСТУП

У сучасному світі бездротова передача енергії є ключовою технологією, яка відіграє важливу роль у розвитку інноваційних рішень для забезпечення живлення широкого спектра пристроїв. Її застосування охоплює різні сфери, включаючи споживчу електроніку (зарядні пристрої для смартфонів, планшетів і смарт-годинників), електромобілі (системи індуктивної зарядки), медичні пристрої (імплантати, монітори життєвих показників) і промислові системи (безконтактне живлення роботів та датчиків). Такий підхід дозволяє мінімізувати використання кабелів, підвищити зручність користування та забезпечити безпечніше середовище для роботи електричних пристроїв.

Проте існуючі однофазні системи бездротової передачі енергії мають суттєві обмеження. Основні з них включають низьку потужність передачі, невисоку ефективність, яка залежить від умов навколишнього середовища, та високі напруги в електричних колах. Ці фактори значно ускладнюють впровадження таких систем для пристроїв із високими вимогами до енергопостачання, наприклад, у транспорті або великих промислових установках. Окрім того, однофазні системи можуть мати суттєві втрати енергії через дисбаланс магнітного потоку, а також обмеження щодо стабільності передачі в умовах змінного повітряного зазору між передавальною і приймальною котушками.

Одним із перспективних напрямів вирішення цих проблем є впровадження трифазних систем бездротової передачі енергії, які базуються на створенні трьох потоків магнітного поля з кутовою різницею в 120 градусів. Такий підхід дозволяє досягти рівномірного розподілу магнітного потоку, знизити втрати енергії, зменшити напругу в контурі та суттєво підвищити ефективність передачі. Застосування трифазних систем також сприяє покращенню стабільності передачі енергії та збільшенню робочої відстані між передавальною та приймальною частинами системи.

Для більш повного розуміння потенціалу трифазних систем бездротової передачі енергії варто звернути увагу на кілька ключових аспектів. По-перше, трифазні системи значно знижують енергетичні втрати завдяки рівномірному розподілу магнітного потоку через створення трьох потоків магнітного поля з кутовою різницею в 120 градусів. Це також зменшує вплив змінного зазору між передавальною і приймальною котушками, що є однією з найбільших проблем однофазних систем. По-друге, трифазні системи забезпечують кращу стабільність передачі енергії в умовах змінного навантаження або робочої дистанції. Збільшення робочої відстані між котушками знижує вимоги до точності їхнього розташування, спрощуючи інтеграцію в реальні застосування. Крім того, трифазні системи мають значно вищий рівень енергоефективності в порівнянні з однофазними рішеннями, що дозволяє мінімізувати втрати енергії на нагрівання компонентів і підвищити надійність системи, особливо в умовах підвищеного енергоспоживання, як у випадку з електромобілями або промисловими роботизованими системами.

Впровадження трифазних систем бездротової передачі енергії також відкриває нові можливості для розвитку технологій і вдосконалення існуючих рішень. Наприклад, у сфері електричних автомобілів трифазні системи можуть бути використані для підвищення швидкості і ефективності зарядки акумуляторних батарей, що сприяє розвитку інфраструктури електричного транспорту і зниженню викидів парникових газів. У промислових застосуваннях трифазні системи можуть забезпечити надійну бездротову передачу енергії для роботів і сенсорів, що працюють у складних умовах, забезпечуючи безпеку і продуктивність на рівні сучасних вимог.

Отже, трифазні системи бездротової передачі енергії є важливим кроком вперед у розвитку новітніх технологій, що дозволяють створити більш ефективні, надійні і зручні рішення для широкого спектра застосувань.

У контексті сучасних потреб у надійних і високоефективних системах бездротової передачі енергії, особливо в галузі електромобілів та промислових систем автоматизації, розробка та оптимізація трифазних рішень є актуальною

задачею. Це дозволить створити нові технології, які забезпечуватимуть вищий рівень енергоефективності, менші втрати та покращення експлуатаційних характеристик у порівнянні з існуючими однофазними системами.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка, аналіз та оптимізація трифазної системи бездротової передачі енергії, яка забезпечує підвищення ефективності передачі енергії, зниження втрат магнітного потоку та напруги в контурі.

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

- дослідження топології трифазної резонансної компенсаційної мережі;
- розробку багатофізичної моделі для аналізу характеристик трифазної системи;
- оптимізацію конструкції котушки зв'язку для досягнення кращих показників передачі енергії;
- проведення експериментальних досліджень для підтвердження результатів моделювання.

Актуальність роботи полягає в необхідності розробки ефективних систем бездротової передачі енергії для забезпечення стабільної та високоефективної роботи пристроїв у сучасних технологічних умовах.

У роботі розглядається трифазна система бездротової передачі енергії з фазовим кутом 120 градусів, яка дозволяє знизити втрати енергії та підвищити ефективність передачі порівняно з однофазними системами.

Метод дослідження, використовуваний у даній роботі, базується на чисельному моделюванні з використанням багатофізичних моделей та експериментальній верифікації отриманих результатів.

Об'єктом дослідження є процес бездротової передачі енергії за допомогою магнітного резонансу.

Предметом дослідження є трифазна система бездротової передачі енергії, її топологія, котушки зв'язку та резонансні компенсаційні мережі.

Наукова новизна роботи полягає в оптимізації трифазної магнітно-резонансної системи бездротової передачі енергії, яка забезпечує підвищену ефективність передачі завдяки вдосконаленій конструкції котушок зв'язку та топології резонансної компенсаційної мережі. Запропоновано конструкцію трифазної котушки, яка мінімізує втрати енергії та витoki магнітного потоку, а також покращує стабільність роботи системи. Виконано багатофізичне моделювання взаємодії електричних, магнітних і теплових полів, що дозволило оптимізувати параметри системи. Порівняльний аналіз з однофазними системами підтвердив переваги трифазної топології, зокрема високу ефективність, надійність.

Практичне значення дипломної роботи полягає у розробці та оптимізації трифазної системи бездротової передачі енергії, яка дозволяє підвищити ефективність магнітно-резонансних систем передачі енергії. Це включає зменшення втрат магнітного потоку та напруги, покращення енергетичної ефективності, що може знайти застосування в широкому спектрі високопотужних застосувань, включаючи промислові та побутові системи.

Отримані результати дослідження можуть бути використані для впровадження в сучасні системи бездротової передачі енергії, що дозволить підвищити їхню ефективність і надійність у різних галузях.

За темою дипломної роботи опублікована одна стаття у науковому журналі "Вісник Хмельницького національного університету" № 6 за 2024 р., серія "Технічні науки", який включено до наукометричних баз (Index Copernicus, Google Scholar)

1 ОСНОВИ ТА РОЗВИТОК МАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

1.1 Історичний огляд магнітного резонансу для бездротової передачі енергії

Розвиток магнітного резонансу для бездротової передачі енергії (WPT) бере свій початок з фундаментальних досліджень у галузі електромагнетизму, проведених у XIX столітті. Закон Ампера (1820-ті) та закон Фарадея (1831) забезпечили наукову базу для вивчення взаємозв'язку між електричними та магнітними полями. Джеймс Клерк Максвелл у 1860-х роках узагальнив ці відкриття у формі системи рівнянь, які описують електромагнітні поля та хвилі, заклавши основи сучасної теорії електродинаміки.

На межі XIX і XX століть практичні дослідження в цій сфері очолили піонери, такі як Нікола Тесла, який зробив значний внесок у розвиток бездротової передачі енергії. У 1893 році Тесла описав у своїх лекціях результати досліджень магнітного резонансу та продемонстрував експериментальні установки для бездротової передачі енергії на основі високочастотних осциляторів. Він розробив резонансні індуктивно-ємнісні контури, які забезпечували ефективну передачу енергії через простір. Його підходи до налаштування первинних і вторинних контурів на резонансну частоту стали основою для багатьох сучасних систем.

У першій половині XX століття розвиток бездротових технологій значною мірою зосереджувався на радіо- та телекомунікаціях, проте ідеї Тесли щодо передачі енергії залишалися актуальними. Розвиток матеріалів, таких як ферити, та вдосконалення інженерних підходів до конструкції індуктивних елементів дали змогу повернутися до вивчення магнітного резонансу для енергетичних потреб у другій половині століття.

У 2007 році команда дослідників з Массачусетського технологічного інституту (MIT) запропонувала концепцію "WiTricity" (Wireless Electricity) на основі магнітного резонансу, що відзначило новий етап у розвитку бездротової передачі енергії. Використовуючи слабку взаємодію між резонансними індуктивними контурами, було продемонстровано ефективну передачу енергії на відстані кількох метрів із мінімальними втратами. Ця технологія відкрила шлях до створення сучасних пристроїв для зарядки електроніки, електромобілів та інших систем бездротового енергопостачання.

Сьогодні магнітний резонанс залишається однією з найперспективніших технологій для бездротової передачі енергії, поєднуючи наукові принципи XIX століття із сучасними інженерними інноваціями, такими як високоефективні матеріали, метаматеріали та оптимізовані системи керування

1.2 Деякі ранні дослідження Тесли у сфері магнітного резонансу

На межі XX століття активні дослідження у сфері бездротової передачі енергії здійснювали такі піонери, як Нікола Тесла [1][2], Хутін і Леблан [3]. Серед них найбільший вплив на розвиток бездротової передачі енергії на короткі та середні відстані (WPT) мав Нікола Тесла, чії ідеї й розробки залишаються актуальними навіть у сучасних технологіях WPT. Його вважають далекоглядним винахідником, який значно випередив свій час.

Тесла фактично передбачив епоху мобільних телефонів, яка стала реальністю у 1990-х роках. Технологічні інновації Тесли значно вплинули на розвиток суспільства в XXI столітті, що детально висвітлено у [5]. Серед його винаходів варто відзначити індукційні машини, системи передачі електроенергії, радіосистеми, люмінесцентні газорозрядні лампи, рентгенівські апарати, перший у світі човен з дистанційним керуванням,

першу гідроенергетичну систему у світі та, звичайно, технологію бездротової передачі енергії (WPT).

У сучасному світі, де електрика стала настільки поширеною, що сприймається як щось само собою зрозуміле, важко уявити, яким би було життя без неї навіть протягом короткого часу. Винаходи Тесли не лише задали вектор розвитку багатьох технологій, а й забезпечили основу для численних інновацій, які трансформували спосіб життя сучасної людини.

Деякі з ранніх досліджень Тесли у сфері височастотних систем із резонансними явищами були представлені під час його лекції в Інституті Франкліна, Філадельфія, у лютому 1893 року [6]. У своїх експериментах він використовував «послідовний конденсатор із самоіндукцією». Цей індуктивно-ємнісний резонансний контур працював від генератора змінного струму високої частоти. Для досягнення резонансного стану Тесла зазначав, що «і ємність, і самоіндукція мають бути налаштовані у відповідності до частоти генератора».

Налаштовані резонансні контури були центральною темою багатьох його досліджень, зокрема у створенні передавачів і приймачів для радіосигналів та електроенергії. Під час отримання медалі Едісона Тесла, описуючи свої роботи у сфері передачі енергії через простір, зауважив: «Якщо немає приймача, ніде не споживається енергія» [7]. Це пояснюється тим, що приймальна схема є добре налаштованою на частоту передавача, що забезпечує ефективне прийняття енергії. Ідея налаштованої частоти стала визначальною для подальшого розвитку технологій передачі радіо- та телевізійних сигналів.

У магнітно-пов'язаних колах резонанс визначається як коливання енергії між магнітним і електричним полями. У контексті електротехніки це відповідає коливанню енергії між індуктивним елементом (енергія, накопичена в магнітному полі) та ємнісним елементом (енергія, накопичена в

електричному полі). Для систем зі слабким магнітним зв'язком індуктивність витоку є значною. Щоб зменшити або компенсувати ефект індуктивності витоку, можна додати конденсатор послідовно з цією індуктивністю.

У 1893 році Тесла описав свої дослідження у галузі високочастотних та резонансних явищ у праці [6]. Натхненний роботами Генріха Герца та Олівера Лоджа, він представив кілька експериментальних установок, які стосувалися використання високочастотного генератора для передачі енергії без проводів (WPT) з можливим застосуванням у медичних, терапевтичних та інших цілях [1]. Три з цих установок наведені на рис. 2.

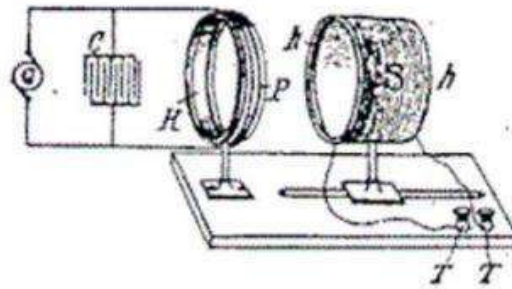
На рис. 1.1,а зображена система, що складається з двох обмоток із магнітним зв'язком: первинної обмотки (P) та вторинної обмотки (S). Первинна обмотка з'єднана паралельно із конденсатором (C) і живиться від генератора високої частоти (Г). Робоча частота генератора встановлювалася в діапазоні 5-10 кГц. У вторинній обмотці дві вихідні клеми позначені буквою Т. Тесла зазначив, що «дві пластини з великою поверхнею, які утворюють регульований конденсатор, можуть бути використані для налаштування вторинної обмотки на частоту первинного кола».

Далі Тесла розглянув використання резонансних контурів, наведених на рис. 1.1, б. У цій схемі два конденсатори С, з'єднані паралельно, включені послідовно з первинною обмоткою Р. Кінці вторинної обмотки підключені до двох наборів паралельних пластин t і t' з великою поверхнею (що утворюють змінний конденсатор). Напругу та струм, отримані на вихідних клеммах Т, можна налаштовувати шляхом зміни відстані між двома парами пластин t і t' . У сучасній термінології така система бездротової передачі енергії складається з послідовно резонансної первинної обмотки та послідовно резонансної вторинної обмотки.

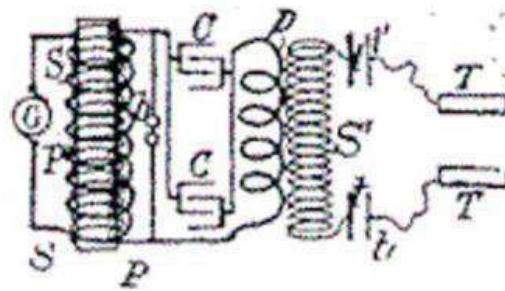
Описуючи роботу системи, зображеної на рис. 1.1, в, Тесла наголосив на ключових аспектах:

- Використанні високої частоти.
- Мінімізації опору обмоток для зменшення втрат.
- Встановленні синхронності між коливаннями в первинному та вторинному контурах.

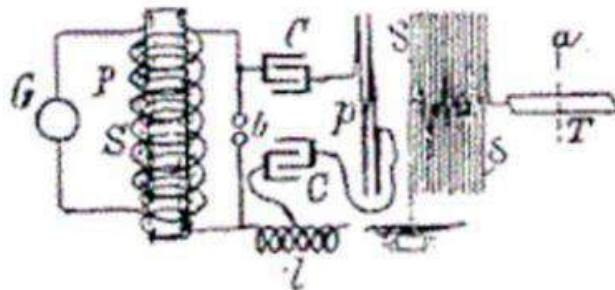
Добротність індуктивної котушки в такій системі визначається як відношення її індуктивного опору до активного опору, що є важливим показником ефективності передачі енергії.



а)



б)



в)

Рисунок 1.1 – Три приклади установок бездротової передачі енергії, запропонованих Tesla

Після того, як Нікола Тесла запропонував свої ідеї щодо бездротової передачі енергії наприкінці XIX століття, різноманітні розробки були спрямовані на реалізацію його теорій. На рисунку 1.1 представлені три приклади установок, які ілюструють різні концепції бездротової передачі енергії, запропоновані Тесла. Перший приклад показує використання високочастотних коливань для бездротового живлення невеликих пристроїв. Другий демонструє можливість передачі енергії на відстані через великі індуктивні котушки, а третій варіант ілюструє застосування приземної радіовежі для передачі енергії через електромагнітне поле на великі відстані. Ці установки підкреслюють різноманітність ідей Тесла щодо бездротової передачі енергії та її потенціал у майбутніх технологічних розробках.

1.3 Огляд основних принципів магнітно-резонансного зв'язку

Магнітно-резонансний зв'язок (МРЗ) базується на фізичних принципах взаємодії між магнітними та електричними полями, які виникають у резонансних електричних контурах. Його ключова ідея полягає в передачі енергії за допомогою магнітного зв'язку між налаштованими на одну частоту передавальним і приймальним резонаторами.

1. Резонанс як основа передачі енергії

Резонанс виникає, коли частота змінного струму в контурі відповідає власній резонансній частоті системи. У резонансному стані енергія ефективно переходить між електричним і магнітним полями:

- Електричне поле зосереджене в ємнісних елементах (конденсаторах).
- Магнітне поле утворюється в індуктивних елементах (катушках індуктивності).

Передача енергії через магнітний зв'язок забезпечується високим рівнем енергетичного обміну між цими полями в первинному (передавальному) та вторинному (приймальному) резонансних контурах.

2. Складові системи магнітно-резонансного зв'язку

Типова система магнітно-резонансного зв'язку складається з:

- Передавального контуру: індуктивно-ємнісний контур, що генерує магнітне поле за допомогою джерела змінного струму.
- Приймального контуру: аналогічного індуктивно-ємнісного контуру, налаштованого на ту саму резонансну частоту, що й передавальний.
- Середовища передачі: простір або матеріал, через який передається магнітне поле.

3. Принцип взаємної індуктивності

Магнітний зв'язок між передавальним і приймальним контурами описується поняттям взаємної індуктивності M , яка визначає, наскільки ефективно магнітний потік, створений одним контуром, перетинає витки іншого.

- Для сильнозв'язаних систем M високе, і передача енергії ефективна.
- У слабозв'язаних системах необхідно використовувати додаткові елементи, такі як конденсатори, для компенсації реактивного опору виток.

4. Налаштування резонансних контурів

Щоб досягти максимальної ефективності, частоти первинного та вторинного контурів мають бути налаштовані на резонансну частоту системи:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1.1)$$

де L – індуктивність, а C – ємність контуру.

У резонансному стані:

- Реактивні опори індуктивності та ємності взаємно компенсуються.

- Потужність передається з мінімальними втратами.

5. Добротність і ефективність передачі

Добротність Q є важливим параметром, що визначає якість резонансного контуру. Вона обчислюється як відношення реактивної енергії до активних втрат:

$$Q = \frac{\omega L}{R}, \quad (1.2)$$

де R – активний опір. Висока добротність сприяє ефективному переносу енергії, але може зменшити робочу ширину частот.

6. Переваги магнітно-резонансного зв'язку

Магнітно-резонансний зв'язок ефективний на середніх відстанях, що перевищують розміри передавальних і приймальних елементів.

Завдяки резонансу досягається висока енергоефективність навіть у слабозв'язаних системах.

Магнітне поле є локалізованим і незначно впливає на оточення.

Магнітно-резонансний зв'язок лежить в основі багатьох сучасних технологій бездротової передачі енергії, таких як зарядні пристрої для мобільних телефонів, електромобілів та медичних імплантів. Його розвиток спирається на вдосконалення резонансних систем, новітні матеріали й оптимізацію інженерних рішень.

1.4 Аналіз проблем, пов'язаних із втратами енергії та низькою ефективністю

Системи магнітно-резонансного зв'язку (МРЗ) є перспективними технологіями для бездротової передачі енергії. Вони знаходять застосування в різних галузях, таких як медичні пристрої, портативна електроніка, зарядні

станції для електромобілів тощо. Однак ефективність таких систем обмежується низкою технічних проблем, які зумовлюють значні втрати енергії. У цьому розділі проведено аналіз основних причин низької ефективності систем МРЗ та можливих напрямків для їх усунення.

Однією з основних причин втрат енергії в системах МРЗ є розсіювання магнітного поля. Електромагнітна енергія, що передається через магнітне поле, частково втрачається внаслідок таких чинників:

- Розсіювання енергії у просторі. При збільшенні відстані між передавачем і приймачем щільність магнітного поля значно зменшується. Це обмежує ефективність передачі енергії на великі відстані.

- Вихрові струми у сторонніх об'єктах. Металеві предмети поблизу системи викликають утворення вихрових струмів, що призводить до додаткових втрат енергії.

- Для зменшення втрат магнітного поля необхідно забезпечувати правильне екранування та оптимальну орієнтацію системи в просторі.

Ефективність передачі енергії в системах МРЗ значною мірою залежить від добротності резонансного контуру (Q-фактора). Основними причинами її зниження є:

- Омичні втрати. Високий опір провідників та втрати в елементах контуру (катушки, конденсатори) знижують енергоефективність.

- Матеріали катушок. Використання матеріалів з низькою провідністю чи недосконалими магнітними властивостями призводить до підвищення втрат.

- Для підвищення Q-фактора рекомендується застосування провідників із надвисокою провідністю (наприклад, мідь або срібло) та зниження паразитних втрат у конструкції системи.

Передача енергії в системах МРЗ можлива лише за умови точного налаштування частоти резонансу передавального і приймального контурів. Причини резонансного розладу включають:

- Частотні відхилення. Робоча частота системи може змінюватися через температурні коливання, старіння компонентів або інші зовнішні фактори.
- Зміщення геометрії. Зміна положення приймача щодо передавача впливає на ефективність зчеплення магнітних полів.
- Рішенням є впровадження адаптивних систем налаштування резонансу, які автоматично компенсують зміни частоти або геометрії.

Реактивна потужність, яка утворюється внаслідок індуктивного характеру резонансних контурів, є ще одним джерелом втрат. Основні проблеми:

Витрати на підтримку електромагнітного поля. Частина енергії витрачається на утворення поля і не передається приймачеві.

Недосконалі компенсаційні схеми. Неякісне налаштування компенсаційних мереж для мінімізації реактивної потужності знижує загальний ККД системи.

Рішенням є оптимізація конструкції компенсаційних схем, що забезпечують ефективне управління реактивною потужністю.

Системи МРЗ піддаються впливу сторонніх електромагнітних сигналів, що призводить до взаємних завад:

- Робота інших пристроїв. Системи, що працюють на близьких частотах, можуть створювати перешкоди, знижуючи якість передачі енергії.
- Поділ енергії між пристроями. При використанні одного передавача для кількох приймачів виникають труднощі з рівномірним розподілом енергії.
- Розв'язанням є застосування технологій частотного розділення або мультиплексування, які дозволяють мінімізувати взаємний вплив пристроїв.

Зовнішнє середовище також може негативно впливати на роботу системи. Основними проблемами є:

- Температурні зміни. Вони змінюють фізичні параметри компонентів системи (наприклад, опір, ємність), що впливає на стабільність резонансу.

- Поглинання енергії. Матеріали, які розташовані між передавачем і приймачем, можуть частково поглинати магнітну енергію, зменшуючи її кількість, що досягає приймача.

- Оптимізація роботи системи у змінних умовах можлива за рахунок використання стабільних матеріалів і додаткових налаштувань.

Аналіз проблем, пов'язаних із втратами енергії та низькою ефективністю, свідчить про необхідність удосконалення конструктивних рішень та використання сучасних матеріалів. До основних напрямків підвищення ефективності можна віднести:

- застосування матеріалів із високою провідністю для котушок і мінімізація паразитних втрат.

- розробка адаптивних схем налаштування резонансу.

- використання ефективних компенсаційних мереж для управління реактивною потужністю.

- оптимізація роботи систем в умовах зовнішніх завад і температурних змін.

Ці рішення можуть стати основою для підвищення ефективності передачі енергії у системах магнітно-резонансного зв'язку.

1.5 Огляд сучасних підходів і технологій оптимізації систем передачі енергії

Оптимізація систем магнітно-резонансного зв'язку є важливим завданням для підвищення ефективності бездротової передачі енергії. Сучасні

технології спрямовані на мінімізацію втрат, покращення стабільності роботи та розширення можливостей застосування таких систем. У цьому розділі наведено огляд ключових підходів і рішень, які застосовуються для підвищення ефективності магнітно-резонансного зв'язку.

Використання матеріалів з високою провідністю

Одним із найефективніших способів зниження втрат енергії є використання матеріалів із високими електричними та магнітними властивостями:

Для виготовлення котушок передавачів і приймачів широко застосовуються мідь, срібло, а також надпровідникові матеріали, що значно зменшують омичні втрати.

Використання високоякісних феритів для формування магнітного осердя знижує втрати в магнітному полі і підвищує концентрацію поля у зоні передачі.

Ці технології дозволяють збільшити добротність резонансного контуру (Q-фактор) та знизити розсіювання енергії.

Геометрія котушок передавача та приймача має важливий вплив на ефективність енергопередачі:

- Плоскі спіралі та багат шарові котушки. Забезпечують краще зчеплення магнітних полів та зменшують розсіювання енергії.

- Індуктивне узгодження. Використання додаткових індуктивних елементів дозволяє налаштувати систему для досягнення максимального зчеплення в умовах змінного положення приймача.

Оптимальна конструкція котушок може суттєво підвищити коефіцієнт корисної дії (ККД) системи.

Компенсаційні мережі використовуються для мінімізації втрат через реактивну потужність, яка виникає внаслідок індуктивного характеру системи:

- LCC- і S-подібні схеми. Забезпечують баланс індуктивності та ємності в контурі, що мінімізує реактивні втрати.

- Адаптивні схеми компенсації. Автоматично налаштовуються під змінні умови роботи системи (зміна частоти, положення приймача тощо).

Такі підходи дозволяють стабілізувати роботу системи та підвищити її ефективність у широкому діапазоні умов.

Значні втрати в системах магнітно-резонансного зв'язку можуть бути викликані розладом резонансу між передавачем і приймачем. Для усунення цього розладу застосовуються:

- Системи з автоматичним налаштуванням. Використовують датчики для визначення резонансної частоти та керування параметрами системи.

- Електронні перемикачі. Регулюють ємність або індуктивність контуру для досягнення резонансу.

Адаптивне налаштування забезпечує стабільну роботу системи навіть за умов зовнішніх перешкод або змін геометрії.

Для зменшення втрат, спричинених розсіюванням магнітного поля, застосовуються технології спрямованої передачі енергії:

- Фокусування магнітного поля. Використання магнітних лінз або спеціальної геометрії котушок для спрямування поля безпосередньо до приймача.

- Екранування полів. Металеві або феритові екрани зменшують взаємодію магнітного поля із зовнішніми об'єктами, знижуючи втрати на сторонні вихрові струми.

Ці технології дозволяють суттєво знизити небажане розсіювання енергії.

У сучасних системах магнітно-резонансного зв'язку застосовується мультичастотний підхід, який дозволяє одночасно передавати енергію на різних частотах:

- Широкосмугові передавачі. Працюють у широкому діапазоні частот, що зменшує вплив резонансного розладу.

- Технологія частотного поділу. Використовується для одночасної передачі енергії декільком приймачам із мінімальними втратами.

Багаточастотні системи забезпечують гнучкість і надійність роботи в умовах складних конфігурацій приймачів.

Сучасні підходи до оптимізації систем магнітно-резонансного зв'язку орієнтовані на вирішення ключових технічних проблем, таких як втрати енергії, резонансний розлад та вплив зовнішнього середовища. Найбільш перспективними технологіями є:

- Застосування високоякісних матеріалів і оптимальних геометрій котушок.

- Використання компенсаційних мереж для мінімізації реактивної потужності.

- Впровадження адаптивного налаштування резонансу та технологій спрямованого магнітного поля.

Ці підходи дозволяють забезпечити стабільну, ефективну та надійну роботу систем передачі енергії в широкому спектрі застосувань.

Сучасні мультичастотні системи магнітно-резонансного зв'язку мають важливе значення для підвищення ефективності та надійності передачі енергії. Вони дозволяють адаптуватися до різних умов використання, зменшуючи втрати енергії та покращуючи стабільність роботи навіть у складних умовах. Однією з переваг мультичастотного підходу є можливість підтримувати передачу енергії на оптимальних частотах, що сприяє зниженню втрат через електромагнітне перешкоджання та оптимізації ефективності в системах з декількома приймачами.

Додатково, мультичастотні системи можуть бути використані для розширення можливостей передачі енергії на великі відстані. Завдяки

гнучкості у виборі частот, вони можуть адаптуватися до змінних умов середовища, таких як зміна повітряного зазору або інтерференція з іншими системами.

1.6 Висновок до першого розділу

У даному розділі розглянуто історичний розвиток технологій магнітного резонансу, включаючи внесок Ніколи Тесли, а також основні принципи роботи систем магнітно-резонансного зв'язку. Проаналізовано ключові проблеми, зокрема втрати енергії, низьку ефективність та вплив зовнішнього середовища, а також наведено сучасні підходи до їх вирішення, такі як використання високоякісних матеріалів, оптимізація конструкції котушок, компенсаційні мережі, адаптивне налаштування резонансу та впровадження штучного інтелекту. Ці аспекти є основою для подальшого вдосконалення технологій бездротової передачі енергії.

2 АНАЛІЗ ТРИФАЗНИХ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНИХ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВИСОКОПОТУЖНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

У сучасному світі, де технології стрімко розвиваються, бездротова передача енергії стає одним із ключових напрямків інноваційних досліджень. Ця технологія відкриває нові можливості для передачі електроенергії без фізичного контакту, що значно розширює спектр її застосувань.

2.1 Огляд сучасних досліджень бездротових систем передачі енергії

Розвиток технологій бездротової передачі енергії в останні десятиліття набув значного поштовху. Сучасні бездротові системи передачі енергії є важливим кроком у створенні інноваційних методів заряджання та живлення різноманітних пристроїв. Їх актуальність визначається зростаючим попитом на інтеграцію таких систем у сфери, що потребують передачі електроенергії без фізичного контакту: імплантоване медичне обладнання, мобільні пристрої, транспортні засоби, підводна розвідка та інші високотехнологічні галузі.

Однофазні бездротові системи передачі енергії, які переважно представлені в літературі, мають свої переваги, зокрема відносну простоту конструкції та низькі втрати енергії. Однофазна котушка типу Тайцзі, яка була запропонована дослідниками, демонструє рівномірний розподіл магнітного поля навколо котушки, що підвищує ефективність передачі енергії. Подальший розвиток однофазних систем включав створення багатокотушкових конструкцій, що дозволяють оптимізувати розташування котушок для підвищення гнучкості та ефективності системи.

Однак основним обмеженням таких систем залишається недостатня здатність передавати високі потужності, що ускладнює їх застосування у масштабних або енергоємних пристроях. Це зумовлює необхідність пошуку

нових рішень, таких як багатофазні системи передачі енергії, зокрема трифазні.

На відміну від однофазних систем, трифазні конструкції мають значно ширший спектр переваг, включаючи підвищену стабільність, ефективність та здатність передавати великі потужності. Основною перевагою трифазної системи є зменшений фазний струм, більш рівномірний розподіл електромагнітного поля та можливість передавати енергію на більші відстані. Крім того, напруга та струм у кожному плечі мостової схеми є нижчими, що підвищує безпеку та надійність роботи системи.

У сучасних дослідженнях трифазні системи отримали велику увагу завдяки своїй ефективності у вирішенні практичних задач. Зокрема, були розроблені системи з асиметричною кількістю передавальних і приймальних котушок, що дозволяють досягти вищого коефіцієнта зв'язку. Наприклад, три круглі передавальні котушки продемонстрували здатність підвищувати потужність системи та обсяг переданої енергії.

Також активно досліджуються багатофазні приймачі, що включають двофазні, трифазні та чотирифазні конструкції. Їх застосування дозволяє уникати проблем, пов'язаних із синусоїдальними коливаннями індукованої напруги, та покращує стабільність передачі енергії. Крім того, трифазні котушки з подвійною D-квадратурною структурою ефективно мінімізують вплив зміщення на продуктивність системи.

Одним із важливих напрямків досліджень є використання обертових магнітних полів у трифазних індуктивних системах. Такі системи забезпечують плавність передачі енергії та високу ефективність навіть за значних коливань положення приймача. Наприклад, біполярна фазова обмотка трифазних систем демонструє покращені характеристики порівняно з однофазними аналогами.

Додатково розробляються системи заряджання для транспортних засобів, що використовують двошарову перекриваючу обмотку трифазних квадратних котушок. Вони забезпечують стабільну передачу енергії під час руху та збільшують енергоефективність системи.

Однофазні системи, незважаючи на їх конструкційну простоту, мають обмежені можливості передачі потужності. У той же час трифазні системи демонструють суттєві переваги в ефективності, стабільності та здатності працювати в умовах зміщення приймача. Складність моделювання багатоспіральних та асиметричних конструкцій потребує впровадження симетричних трифазних систем, які можуть забезпечити оптимізацію процесу передачі енергії.

Сучасні дослідження бездротових систем передачі енергії підтверджують доцільність переходу від однофазних до трифазних систем. Використання трифазних конструкцій дозволяє досягти високої продуктивності, знизити втрати енергії та підвищити стабільність системи. У рамках подальших досліджень пропонується розробка симетричних трифазних структур, які дозволять значно покращити ефективність магнітно-резонансних систем передачі енергії та розширити можливості їх практичного застосування.

Дослідники запропонували однофазну котушку типу Тайцзі, яка дозволяє досягти більш рівномірного розподілу магнітного поля навколо котушки [9]. Було розроблено однофазну систему бездротової передачі енергії на основі кількох котушок, яка підвищує ефективність передачі та гнучкість системи завдяки оптимальному розташуванню котушок [10]. Проте такі конструкції котушок не відповідають вимогам для передачі високої потужності. У цьому контексті трифазна система може забезпечити швидшу та безпечнішу передачу великих потужностей, оскільки напруга та струм кожного плеча мостової схеми є низькими. Крім того, трифазна система має

переваги, такі як менший фазний струм і більш рівномірний розподіл електромагнітного поля в порівнянні з однофазною. Це робить трифазну бездротову систему передачі енергії більш придатною для високопотужних застосувань [11].

Останніми роками дослідження трифазних бездротових систем передачі енергії значно просунулися в різних галузях застосування. Зокрема, були розроблені системи з асиметричною кількістю передавальних і приймальних котушок. Наприклад, у деяких експериментах використовували три круглі передавальні котушки для підвищення потужності системи та збільшення обсягу переданої енергії [12]. Також було запропоновано багатофазний приймач, який включає двофазні, трифазні та чотирифазні конструкції для вирішення проблем синусоїдальних коливань індукованої напруги в багатополосних котушках вздовж напрямку руху [13]. Крім того, трифазна котушка з подвійною D-квадратурною структурою ефективно збільшила можливості системи протидіяти зміщенню [14].

Інші дослідження зосередилися на використанні трифазної індуктивної бездротової системи з біполярною фазовою обмоткою, яка застосовує обертове магнітне поле для забезпечення більш плавної передачі енергії порівняно з однофазними системами [15]. Запропоновані системи з кількома передавальними та приймальними котушками спрямовані на вирішення проблем, пов'язаних із переміщенням елементів [16]. Також розроблено систему заряджання для транспортних засобів, яка використовує двошарову перекиваючу обмотку трифазних квадратних котушок [17].

Однофазні конструкції, описані в літературі, здатні витримувати значно меншу потужність порівняно з трифазними системами. Співвідношення коефіцієнта зв'язку між багатоспіральними та асиметричними структурами є складнішим. Отже, в кваліфікаційній роботі детально розглянуто симетричну

трифазну структуру з'єднання для оптимізації та підвищення ефективності магнітно-резонансних систем бездротової передачі енергії

2.2 Аналіз використання магнітно-резонансних схем

Бездротова передача енергії (WPT) є перспективною технологією завдяки її бездротовій природі, безпеці під час заряджання та здатності працювати в умовах вологи та суворих середовищ [11]. Ця технологія набула міжнародного визнання і активно використовується для енергопостачання в різних галузях, зокрема для електромобілів (EV) [12, 13], електричних автомобілів з онлайн-зарядкою (OLEV) [14], гібридних електричних транспортних засобів (PHEV) [18], магнітно-левітуючих поїздів (маглев) [19], імплантованих медичних пристроїв (IMD) [20], а також для споживчої електроніки [20]. Крім того, система бездротової передачі енергії використовувалася в системах зарядки автономних підводних апаратів (AUV), роторних газових турбінах і додатках Інтернету речей (IoT).

Залежно від механізму передачі енергії, технологію бездротової передачі енергії можна поділити на дві основні категорії. Перша категорія – це бездротова передача енергії дальнього поля, яка також відома як електромагнітне випромінювання бездротової передачі енергії. Вона включає мікрохвильову передачу енергії (MPT), лазерну передачу енергії (LPT) та супутникові системи сонячної енергії (SPS).

Друга категорія – це бездротова передача енергії ближнього поля (рис. 2.1), яка, у свою чергу, поділяється на два підтипи. Перший – це індуктивна передача енергії, що включає індуктивну бездротову передачу енергії (ICPT або IPT) та магнітно-резонансну зв'язану бездротову передачу енергії (MCR WPT), де на рис. 2.1 Tx позначає передавальну котушку, а Rx – приймальну котушку.

Деякі системи індуктивної бездротової передачі енергії демонструють високу ефективність передачі енергії, що перевищує 90% при передачі на невеликі відстані (десятки сантиметрів). Однак ефективність значно знижується для більших відстаней [23]. Тим не менш, було представлено інноваційну систему індуктивної бездротової передачі енергії, яка дозволяє передавати електроенергію на відстань до 5 м за допомогою дипольних котушок [24]. Більшість систем ємнісної передачі енергії розроблені для застосувань з низьким споживанням енергії, таких як USB-пристрої, лампи та малі роботи [25], де відстань передачі обмежена міліметровим діапазоном. Більша ефективність забезпечується магнітно-резонансною зв'язаною бездротовою передачею енергії при передачі на більші відстані.

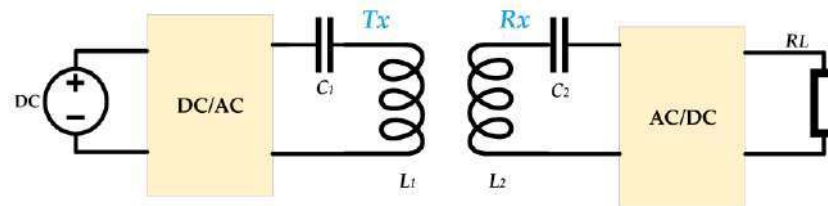


Рисунок 2.1 – Структура індуктивної передачі енергії та магнітно-резонансної зв'язаної бездротової передачі енергії

На рисунку 2.1 представлена структура індуктивної передачі енергії та магнітно-резонансної зв'язаної бездротової передачі енергії. Індуктивна передача енергії передбачає безпосереднє взаємодію між котушками індуктивності для передачі енергії через змінний магнітний потік. Магнітно-резонансна зв'язана система використовує мультичастотний підхід, який забезпечує ефективну передачу енергії через змінне магнітне поле на різні частоти, що дозволяє знизити втрати енергії та підвищити стабільність системи передачі. Таке поєднання технологій дозволяє адаптуватися до змінних умов використання та знижувати вплив перешкод.

Завдяки своїй значущості та стрімкому розвитку, технологія WPT знайшла широке застосування в останні роки, забезпечуючи практичний спосіб бездротової передачі електроенергії в багатьох комерційних застосуваннях. У цій сфері було виконано значний обсяг досліджень, і літературні джерела містять численні роботи, що охоплюють різні аспекти магнітно-резонансної зв'язаної бездротової передачі енергії. Однак ці аспекти часто викладені в складній формі, що ускладнює їхнє розуміння та відстеження.

2.3 Топології в системах бездротової передачі енергії

Системи бездротової передачі енергії (WPT) вимагають ретельно налаштованої компенсації для забезпечення їх ефективної та стабільної роботи. Основна мета компенсації полягає в оптимізації магнітного поля через резонанс між конденсаторами та індуктивностями на первинній і вторинній сторонах. Це дозволяє мінімізувати навантаження на джерело живлення та максимізувати передачу енергії. Крім того, системи WPT мають забезпечувати стабільність виходу у вигляді постійної напруги (CVO) або струму (CCO) відповідно до вимог застосування. Ключовими параметрами для досягнення максимальної ефективності є коефіцієнт зв'язку та добротність системи. Також важливим аспектом є управління опором біфуркації, що визначає умови нульового фазового кута (ZPA) для оптимізації енергопередачі.

Системи бездротової передачі енергії (WPT) потребують ретельно налаштованої компенсації для забезпечення їх ефективної та стабільної роботи. Основна мета компенсації полягає в оптимізації магнітного поля через резонанс між конденсаторами та індуктивностями на первинній і вторинній сторонах. Це дозволяє мінімізувати втрати енергії і забезпечити стабільну передачу енергії навіть при змінних умовах навколишнього середовища. Крім

того, ефективність передачі енергії безпосередньо залежить від якості зв'язку між котушками індуктивності. Високий коефіцієнт зв'язку забезпечує низькі втрати енергії та стабільний рівень вихідної напруги або струму.

Також для досягнення максимальної ефективності важливо враховувати добротність системи, яка визначає здатність котушки зберігати енергію. Добротність характеризується співвідношенням енергії, що зберігається в системі, до втрат енергії через навантаження і тепло. Управління опором біфуркації є також критичним аспектом для оптимізації енергопередачі, оскільки воно визначає умови нульового фазового кута (ZPA). Це дозволяє досягти максимальної передачі енергії шляхом синхронізації фаз між первинною і вторинною сторонами, що знижує втрати через реактивну потужність і покращує загальну ефективність системи WPT.

2.4 Основна та гібридна топології компенсації

Компенсаційні топології в системах WPT поділяються на дві основні групи: основні та гібридні топології. Основні топології включають чотири ключові конфігурації, які формують базову основу для налаштування компенсації. Гібридні топології, у свою чергу, являють собою комбінації послідовних і паралельних схем, що дозволяє досягати більшої гнучкості та ефективності в залежності від конкретних вимог застосування.

У численних дослідженнях було розглянуто різні компенсаційні топології. Як показано на рисунку 2.2, існують чотири основні компенсаційні топології: послідовно-послідовна (SS) [26], послідовно-паралельна (SP) [91], паралельно-послідовна (PS), та паралельно-паралельна (PP). На рисунку 2.2 параметри топологій визначаються так: k – коефіцієнт зв'язку, M – взаємна індуктивність, U_1 – вхідна напруга первинної сторони, U_2 – напруга на навантаженні, R_1 – опір навантаження. Параметри L_1 , L_2 , C_1 , і C_2 – це власні

індуктивності та зовнішні компенсаційні конденсатори первинної та вторинної котушок відповідно, а R_1 і R_2 – це активні опори первинної та вторинної котушок.

Окрім основних схем, активно досліджуються гібридні компенсаційні топології, такі як LCC-P та LCL-P, де LCC і LCL використовуються на стороні передачі, а паралельна (P) схема – на стороні прийому [27]. Інші варіанти включають S-CLC [94], CCL-S [95], LCL-S [96], та LCC-LCC [18]. Зокрема, двосторонню схему LCC-компенсації з мульти-LCC на стороні передавача було представлено в [27], а схему LCL-LCL розглянуто в [28]. Деякі з найбільш поширених гібридних топологій, які використовуються в дослідницькій практиці, наведено на рисунку 2.3. У цих схемах L_p і L_s позначають первинну та вторинну індуктивності відповідно.

Окрім основних схем, активно досліджуються гібридні компенсаційні топології, такі як LCC-P та LCL-P, де LCC і LCL використовуються на стороні передачі, а паралельна (P) схема – на стороні прийому [30]. Ці топології дозволяють ефективно поєднувати переваги різних типів компенсації, забезпечуючи високу ефективність передачі енергії, зменшення втрат у системі та гнучкість у налаштуванні параметрів.

Інші варіанти включають такі популярні конфігурації, як S-CLC [31], CCL-S, LCL-S та LCC-LCC. Кожна з цих топологій має свої особливості. Наприклад, S-CLC використовується для зменшення реактивних втрат за рахунок серійної компенсації, тоді як CCL-S і LCL-S забезпечують більш точну настройку системи для мінімізації втрат і підвищення стабільності. Конфігурація LCC-LCC дозволяє досягти симетричної компенсації як на стороні передавача, так і на стороні приймача, що робить її ефективною для високопотужних систем.

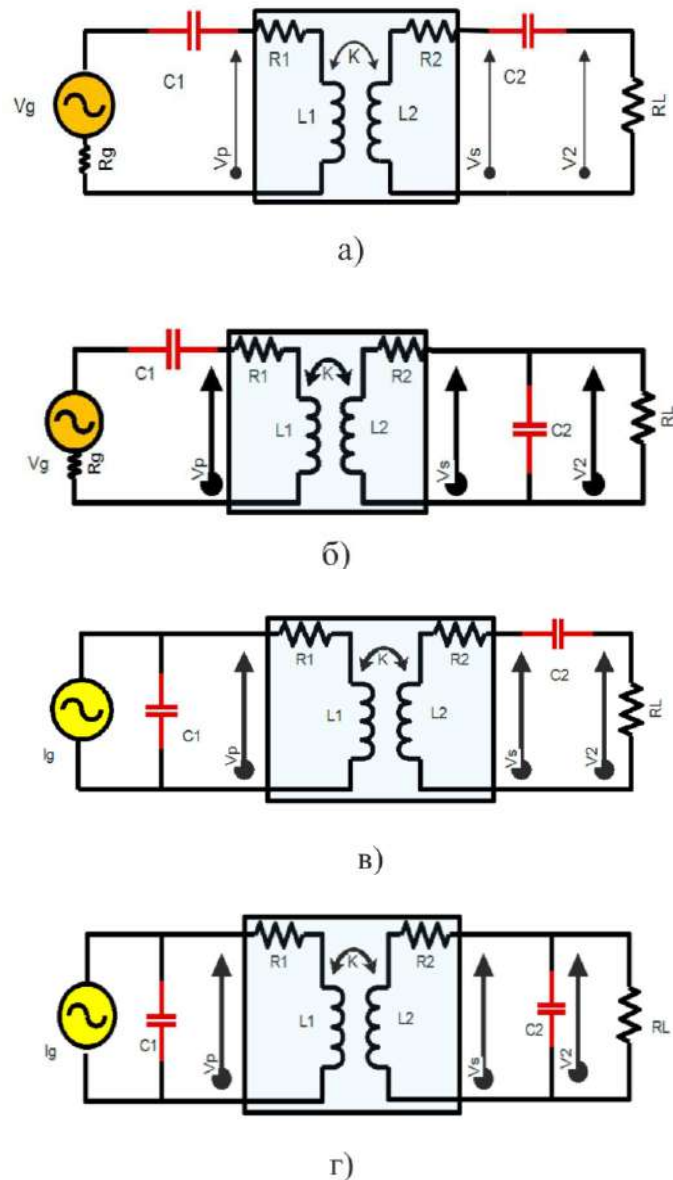


Рисунок 2.2 – Основні топології компенсації: а) – Послідовно-послідовна (SS); б) – Послідовно-паралельна (SP); в) – Паралельно-послідовна (PS); г) – Паралельно-паралельна (PP)

Зокрема, двосторонню схему LCC-компенсації з мульти-LCC на стороні передавача було представлено в [28]. Ця схема дозволяє передавати енергію одночасно до декількох приймачів, що особливо корисно в системах з розподіленим живленням, таких як зарядні станції для електромобілів. Аналогічно, схема LCL-LCL, розглянута в [29], демонструє переваги в забезпеченні стабільності передачі енергії за наявності значного зміщення між передавачем і приймачем.

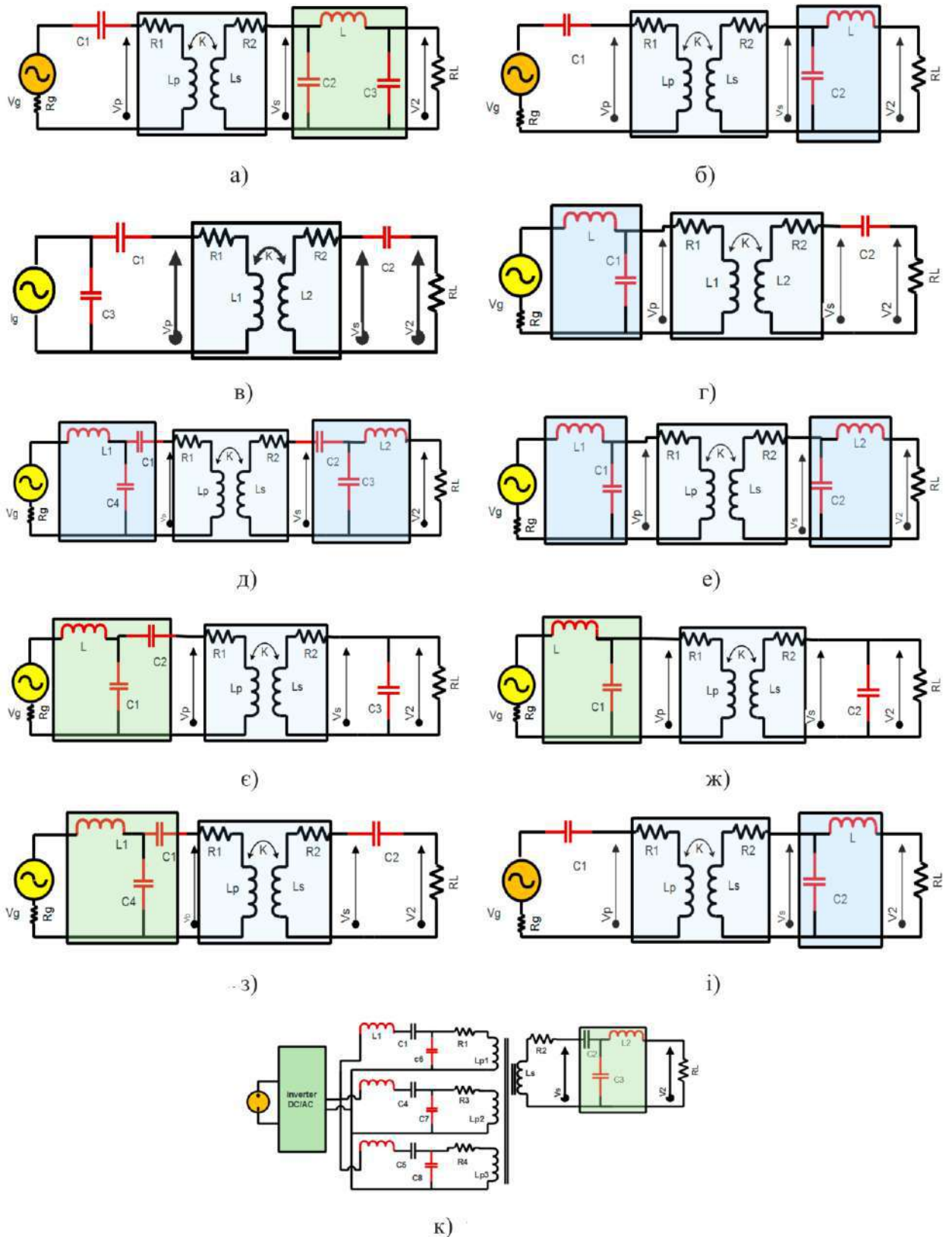


Рисунок 2.3 – Гібридні топології компенсації:

- а) – S-CLC; б) S-LCL; в) – CCL-S; г) – LCL-S; д) – LCC-LCC; е) – LCL-LCL;
 є) – LCC-P; ж) – LCL-P; з) – LCC-S; и) – S-LCL; к) – Двостороння LCC

2.5 Огляд різних систем бездротової передачі енергії на основі топології та типу застосування

У таблиці 2.1 представлено порівняння різних систем бездротової передачі енергії (WPT), що базуються на різних топологіях компенсації та мають специфічні застосування, зокрема для електромобілів. Основними параметрами для оцінки таких систем є передана потужність, резонансна частота f_0 , коефіцієнт зв'язку k , значення навантаження R_L , кількість витків котушок N_1 та N_2 , а також розміри резонаторів: довжина D_1 і D_2 або діаметр котушок передавача та приймача. Також враховуються вихідна потужність $P_{\text{вих}}$ та вихідна напруга $U_{\text{вих}}$. У таблиці 2.2 подано детальний аналіз WPT-систем для динамічної зарядки електромобілів, які забезпечують передачу енергії на ходу, що є перспективним напрямом розвитку електротранспорту.

Топології WPT-систем мають різні характеристики. Наприклад, у системах із компенсацією типу PS реактивний струм резонансного перетворювача циркулює в межах паралельного резонансного контуру, уникаючи комутаційних пристроїв. Це знижує струмове навантаження на комутаційні елементи, зменшуючи втрати провідності, що є критично важливим для високої потужності. Однак недоліком цієї топології є висока напруга на перемикачах інвертора, особливо в умовах високих потужностей, і зниження ефективності при низьких значеннях коефіцієнта зв'язку.

Гібридна топологія CCL-S, представлена на рис. 2.5в, додає послідовний конденсатор на первинній стороні, що дозволяє зменшити втрати на комутації порівняно з паралельною LC-S топологією. Паралельно LC-компенсовані системи оптимально підходять для застосувань із низькою вихідною напругою, тоді як топологія CCL є більш ефективною при роботі з високою напругою.

Система S-CLC, зображена на рис. 2.5а, забезпечує нульовий кут потужності (Zero Power Angle, ZPA) з меншими зусиллями. У свою чергу, двосторонні топології, такі як LCC та LCL (рис. 5к), є основою для безперервної динамічної зарядки електромобілів, зокрема для трасових систем WPT.

Характеристики вихідного струму та напруги змінюються залежно від топології компенсації. Для SS, S-LCL, S-CLC та SP ці параметри мають обернену залежність від взаємної індуктивності, тоді як вихідна потужність обернено пропорційна квадрату взаємної індуктивності. Натомість у двосторонніх топологіях LCL, LCC, LCL-S, LCL-P, PS та PP вихідний струм і напруга пропорційні взаємній індуктивності, а вихідна потужність пропорційна квадрату взаємної індуктивності. Ці залежності є основою для розробки методів проектування WPT-систем.

Розглянуто два випадки проектування WPT-систем. У першому випадку система SS спроектована для передачі номінальної потужності за умов максимальної взаємної індуктивності, що відповідає ідеально вирівняним котушкам. У таких умовах система демонструє високу вхідну напругу, високий коефіцієнт корисної дії (ККД) та низьку силу струму. У другому випадку система LCC оптимізована для роботи за мінімальної взаємної індуктивності, що відповідає умовам максимальної неузгодженості між котушками. Це дозволяє забезпечити стабільну передачу енергії навіть у несприятливих умовах.

Таким чином, аналіз WPT-систем різних топологій демонструє їх переваги та обмеження, дозволяючи обрати оптимальне рішення залежно від специфічних вимог застосування, таких як передана потужність, робоча відстань та стабільність роботи за умов зміни вирівнювання котушок.

Таблиця 2.1 – Огляд різних систем WPT залежно від топології та типу застосування (наприклад, електромобілі або гібридні електричні транспортні засоби). ЕМІ: електромагнітні перешкоди

Топологія	$f_0/k/R_L$ (кГц, Ом)	$P_{вихід}$, $V_{вихід}$	ККД	Резонатори				Примітка
				N_1 N_2	D_1 мм, Діаметр мм	D шири на 2 мм, діаметр мм	Зазор мм	
SS/LCC-	$f_0 = 85$ $k = 0,135$ $R_L = 2, 3, 5$	1 кВт 50 В	95% для SS і 93% для LCC	10 8	500 діаметр	400 діаметр	200	Виходячи з ЕМІ, топологія LCC-LCC вважається більш стійкою до впливу ЕМІ.
SS/LCC-LCC	$f_0 = 79$	7,7 кВт макс. 270~40 5 В	Для LCC: 96%	-	800	600	200	Топологія LCC-LCC має вищу ефективність, коли взаємна індуктивність мінімальна.
SS/LCL-LCL	$f_0 = 85$ $k = 0,1$ $R_L = 10$	3,3 кВт	93,1% для SS, 89,5% для LCC	20 × 3 шари 17 × 2 шари	550 × 400 мм ²	240 × 240 мм ²	100	У порівнянні з топологією SS тип LCL-LCL має високий коефіцієнт потужності.
LCC-LCC	$f_0 = 79$ $k =$ 0,18~0,32 $R_L =$ 10~200	7,5 кВт 450 В	96%	1	800	600	200	Резонансна частота f_0 не залежить від коефіцієнта зв'язку та умов навантаження.
LCC-LCC	$f_0 = 95$ $k = 0,14$ – 0,30	5,6 кВт 300~45 0 В	95,36%	-	600 200	600 200	150	Додаткові зв'язки, викликані інтеграцією, дають більше місця для магнітних сердечників.
LCC-LCC	$f_0 = 85$ $k = 0,153$ $R_L = 49,95$	3,3 кВт 405,7 В	92,6%	18 16	600	300	150	Зберігання енергії не має відношення до типу топології, а лише до рівня переданої потужності та коефіцієнту зв'язку.
LCC-LCC	$f_0 = 85$ $k = 0,1877$	3 кВт 300 В	95,5%	-	600 × 450 × 4 мм ³ 640 × 496 × 8 мм ³ 711,2 × 558,8 × 2 мм ³	400 × 300 × 4 мм ³ 480 × 352 × 8 мм ³ 508 × 406 × 2 мм ³	150	Конструкція компенсованого резонатора допомагає усунути або зменшити до невеликого рівня ефекти додаткового зв'язку.

Таблиця 2.2 – Огляд систем WPT, що застосовуються для динамічної зарядки електромобілів та гібридних електромобілів

Топологія	$f_0 / k / R_L$ (кГц, Ом)	$P_{\text{вихід}}, V_{\text{вихід}}$	ККД	Розміри котушок і кількість витків	Зазор мм	Примітка
LCL-S LCC-S	$f_0 = 140$ $k = 0,18-0,32$	Номинальна потужність: 1 кВт 80~90 В	Схожі: LCC і LCL: 93%	Радіус котушки 163 мм	100	Топологія забезпечує більш стійкий характер передачі потужності проти зміни k .
Двосторонній LCC	$f_0 = 85$ $k = 0,13$	1,4 кВт 150 В	89,78%	9 витків для кожного передавача, котушка $T_x 6 \times (388 \text{ мм} \times 400 \text{ мм})$, а для R_x : $485 \text{ мм} \times 400 \text{ мм}$	150	У цьому документі представлена безперервна динамічна система WPT, яка зменшує пульсації потужності.
LCL	$f_0 = 85$ $k = 3,7-5,4\%$	5 кВт	-	Вторинний: $0,35 \text{ м} \times 0,7 \text{ м}$ феритовий матеріал N87 (кожен $93 \text{ мм} \times 28 \text{ мм} \times 16 \text{ мм}$).	240	Система розроблена для живлення по всій довжині доріжки шляхом активації лише однієї основної колодки.
SS	$f_0 = 85$ $k = 0,4$	20 кВт	80%	Розміри передавача $10 \text{ см} \times 75 \text{ см}$, кількість витків: дев'ять, приймач: $25 \text{ см} \times 20 \text{ см}$, кількість витків: 12.	100	Зменшений прототип працює на частоті $85 \text{ кГц} \pm 2,5 \text{ кГц}$.
SP	$f_0 = 23$ $R_L = 2$	2 кВт	-	Діаметр рулонів: 330 мм. Витки: сім витків для котушки передавача і п'ять витків для котушки приймача.	100	У цьому документі представлено технічні аспекти рухомих WPT для зарядання електромобілів і електромобілів.
SS	$f_0 = 85$	-	Співвідношення довжини колодок 97,6% становить 1:1	Зовнішня ширина котушки: 58 мм Внутрішня ширина котушки 38 Діаметр дроту 5 мм Кількість витків: 8 витків.	200	Досліджували форму колодки: вплив варіації співвідношення між довжиною T_x і R_x щодо поведінки зчеплення.

У таблиці 2.1 особливу увагу приділено впливу електромагнітних перешкод (ЕМІ) та стабільності передачі енергії за різних умов вирівнювання котушок. Огляд демонструє, як різні топології компенсації можуть впливати на ефективність передачі енергії, стабільність роботи системи та їхню придатність для конкретних застосувань.

У високочастотних колах виникає проблема узгодження імпедансу, коли компоненти схеми набувають безрезистивних властивостей. Для досягнення максимальної ефективності передачі потужності необхідно забезпечити узгодження імпедансу схеми, щоб мінімізувати ці ефекти [31]. Для цього були запропоновані різні методи узгодження імпедансу, такі як застосування інвертора імпедансу лише на стороні приймача [32] та використання двосмугової мережі компресії опору (RCN) як узгоджувальної мережі [109].

Аналіз таблиць 2.1 і 2.2 показує, що вибір топології систем бездротової передачі енергії (WPT) тісно пов'язаний зі специфікою їхнього застосування, а також вимогами до ефективності, стабільності та мінімізації електромагнітних перешкод (EMI). Для стаціонарних зарядних станцій електромобілів і гібридних транспортних засобів найчастіше використовуються топології LCC та LCL. Ці схеми забезпечують високу ефективність передачі енергії завдяки оптимальній компенсації реактивної потужності, стабільності роботи при високих потужностях і зниженню втрат енергії. Додатково, такі топології ефективно зменшують EMI, що особливо важливо для збереження екологічності та відповідності міжнародним стандартам.

У динамічних зарядних системах, що використовуються для електромобілів у русі, перевага надається багатофазним і багатокотушковим конструкціям. Ці системи мають підвищену стійкість до зміщення котушок, яке виникає через нерівномірний рух транспортного засобу або неспіввісність резонаторів. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервну та стабільну передачу енергії під час руху, що є ключовою вимогою для динамічного заряджання. Крім того, багатофазні системи можуть значно зменшити пульсації струму, покращуючи загальну стабільність роботи системи.

Для портативних пристроїв, медичного обладнання та побутової техніки частіше застосовуються простіші серійні компенсаційні схеми, такі як SS або SP. Ці топології мають просту конструкцію, низькі витрати на виробництво та достатню ефективність для передачі енергії на малі відстані. Водночас такі

системи можуть мати підвищену чутливість до зміщення котушок і зниження коефіцієнта зв'язку.

Зменшення ЕМІ залишається важливим аспектом для всіх типів систем WPT. Цього досягають шляхом вдосконалення конструкції котушок, зокрема вибору матеріалів із низькою магнітною проникністю, геометричної оптимізації обмоток і застосування активних методів компенсації електромагнітних перешкод. У динамічних системах, де електромагнітні перешкоди можуть суттєво впливати на інші електронні компоненти, впровадження екранів і синхронізація роботи котушок є обов'язковими. Таким чином, правильний вибір топології та її адаптація до умов експлуатації дозволяють досягти оптимального балансу між ефективністю, стабільністю та мінімізацією негативного впливу на навколишнє середовище.

2.6 Висновок до другого розділу

У даному розділі проведено детальний огляд та аналіз різних аспектів трифазних магнітно-резонансних систем бездротової передачі енергії для високопотужних застосувань. Розглянуто ключові компоненти магнітно-резонансних схем, топології компенсації, а також вплив різних типів топологій на ефективність систем передачі енергії. Детально обговорені основні та гібридні топології компенсації, їх переваги та обмеження в контексті застосування для різних типів систем, зокрема для електричних та гібридних автомобілів. Також здійснено порівняння різних систем бездротової передачі енергії за допомогою класифікації на основі топології та типу їх застосування.

3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ З ПОКРАЩЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Зі швидким розвитком технологій бездротової передачі енергії, проектування та моделювання таких систем стають важливими етапами для досягнення високої ефективності, надійності та стабільності передачі енергії на великі відстані. Бездротові системи передачі енергії мають значний потенціал для застосування в різних галузях, включаючи медицину, мобільні пристрої, транспорт та інші високотехнологічні сфери. Оскільки традиційні однофазні системи не завжди здатні забезпечити необхідну потужність та ефективність, стає все більш актуальним використання трифазних систем, які здатні значно покращити параметри передачі енергії. У цьому розділі розглядаються основні принципи проектування та моделювання трифазних бездротових систем, а також ефективні методи, що дозволяють досягти оптимальних результатів в умовах реальних застосувань. Особлива увага приділяється ключовим аспектам, таким як компенсаційні топології, вплив індуктивності, а також методи зменшення втрат енергії і підвищення ефективності в процесі передачі.

3.1 Математичний аналіз коефіцієнта магнітного зв'язку в бездротових системах передачі енергії

Бездротова передача електроенергії є перспективним напрямом у сучасній енергетиці, який відкриває нові можливості для заряджання електричних пристроїв, живлення транспортних засобів та реалізації інноваційних рішень в промислових і побутових сферах. Одним із ключових факторів, що впливають на ефективність таких систем, є механізм магнітного зв'язку між передавальними та приймальними котушками. Від розмірів,

форми та просторового розташування цих компонентів залежить як потужність передачі, так і загальна ефективність системи.

Коефіцієнт магнітного зв'язку, який визначає, скільки магнітної енергії передається приймачеві, відіграє центральну роль у досягненні високої продуктивності. Проектування систем із високим коефіцієнтом зв'язку дозволяє мінімізувати втрати енергії у навколишньому середовищі, що є важливим для широкого впровадження бездротових технологій передачі енергії. Наукова література пропонує численні підходи до оптимізації магнітного зв'язку, серед яких найчастіше розглядаються однофазні структури, які характеризуються простотою реалізації та зниженими втратами.

Однак, для систем із високою потужністю виникає необхідність пошуку більш досконалих рішень, які дозволять досягти оптимального балансу між компактністю, ефективністю та продуктивністю. Одним із ключових аспектів, який визначає ефективність і продуктивність бездротових систем передачі енергії, є коефіцієнт магнітного зв'язку (k).

Цей параметр характеризує, наскільки ефективно енергія, створена магнітним полем випромінювача, передається до приймача. Саме високий коефіцієнт магнітного зв'язку дозволяє мінімізувати втрати енергії та забезпечити стабільну роботу системи, що є критично важливим для потужних застосувань.

Коефіцієнт магнітного зв'язку обчислюється за формулою:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (3.1)$$

де M – взаємна індуктивність між котушками випромінювача та приймача; L_1 – індуктивність котушки випромінювача; L_2 – індуктивність

котушки приймача.

Потужність передачі ($P_{\text{вих}}$) Передана потужність у системі WPT прямо пропорційна коефіцієнту магнітного зв'язку:

$$P_{\text{вих}} \propto k^2. \quad (3.2)$$

Зменшення коефіцієнта магнітного зв'язку k знижує передану потужність, оскільки взаємна індуктивність зменшується через розсіювання магнітного поля в навколишньому середовищі.

Ефективність передачі (η) визначається як відношення корисної

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{1 + k^2 Q_1 Q_2}. \quad (3.3)$$

де Q_1, Q_2 – добротності котушок випромінювача та приймача відповідно.

Зі зростанням коефіцієнта магнітного зв'язку k ефективність η системи наближається до 100%, оскільки втрати в навколишньому середовищі мінімізуються.

Коефіцієнт коефіцієнта магнітного зв'язку k залежить від таких геометричних параметрів:

Розташування котушок: Максимальне значення коефіцієнта магнітного зв'язку k досягається, коли котушки розташовані коаксіально.

Відстань між котушками (d): Із збільшенням d коефіцієнт магнітного зв'язку k зменшується експоненціально.

Форма котушок: Круглі та спіральні котушки зазвичай забезпечують вищий коефіцієнт магнітного зв'язку порівняно з прямокутними.

У літературі зазначено, що більшість механізмів зв'язку в однофазних системах базуються на спрощеній конструкції з меншими втратами.

Наприклад, однофазні системи на основі магнітного зв'язку характеризуються нижчими значеннями коефіцієнта магнітного зв'язку k через обмеженість їх застосування для високопотужних задач.

Математичний аналіз коефіцієнта магнітного зв'язку демонструє, що його оптимізація є критично важливою для підвищення ефективності та продуктивності бездротових систем передачі енергії. Застосування трифазних систем може значно покращити коефіцієнта магнітного зв'язку k , забезпечуючи вищу потужність і стабільність передачі, особливо для високопотужних додатків.

3.2 Математичний аналіз однофазних і трифазних систем бездротової передачі енергії

Основна різниця між однофазними та трифазними системами бездротової передачі енергії полягає в їх структурі, здатності до передачі потужності, ефективності та стабільності. Для опису таких систем використовується математичне моделювання параметрів напруги, струму, взаємної індуктивності та магнітного поля.

Однофазна система характеризується використанням однієї передавальної та приймальної котушки, де розподіл магнітного поля описується спрощеною залежністю. Трифазна система включає три котушки з фазовим зсувом, які забезпечують рівномірний розподіл електромагнітного поля та підвищену стабільність передачі.

Для однофазної системи напруга $U(t)$ на виході передавальної котушки моделюється за допомогою гармонічної функції:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t), \quad (3.4)$$

де U_0 – амплітудне значення напруги; ω – кутова частота ($\omega=2\pi f$); t – час.

Передана потужність однофазною системою визначається як:

$$P = \frac{1}{2} U_0^2 \cdot \frac{R_n}{R_{вн} + R_n}. \quad (3.5)$$

де $R_{вн}$ – внутрішній опір джерела; R_n – опір навантаження.

Ефективність однофазної системи суттєво знижується при збільшенні відстані між котушками, оскільки взаємна індуктивність зменшується експоненціально.

Трифазна система використовує три передавальні котушки зі зміщенням фаз на 120° . Напруги на котушках описуються такими виразами:

$$\begin{aligned} U_A(t) &= U_0 \sin(\omega t) \\ U_B(t) &= U_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right). \\ U_C(t) &= U_0 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Рівномірний розподіл магнітного поля створюється сумою векторів магнітної індукції B , що генеруються кожною котушкою. Повний вектор магнітного поля визначається як:

$$B_{заг} = B_A + B_B + B_C. \quad (3.7)$$

$$B_i = \mu_0 \frac{NI_i}{2R}. \quad (3.8)$$

де N – кількість витків, I_i – струм через котушку i , R – радіус котушки.

Передана потужність у трифазній системі описується як:

$$P_{3\phi} = 3 \cdot P_{\phi} . \quad (3.9)$$

де P_{ϕ} – потужність однієї фази, розрахована аналогічно однофазній системі.

Взаємна індуктивність у трифазних системах

У трифазній системі взаємна індуктивність M між передавальними та приймальними котушками для симетричного розташування визначається як:

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} . \quad (3.10)$$

де k – коефіцієнт зв'язку, L_1, L_2 – індуктивності котушок.

Для трифазної системи з круглими котушками взаємна індуктивність залежить від геометричного розташування котушок і параметрів з'єднання. Оптимізація взаємної індуктивності M дозволяє значно зменшити втрати та забезпечити ефективну передачу високих потужностей.

Трифазні системи мають переваги у вигляді більш рівномірного розподілу магнітного поля, зменшення фазних струмів та підвищення потужності передачі. Вони забезпечують значно більшу ефективність порівняно з однофазними системами, що робить їх перспективними для високопотужних застосувань.

3.3 Аналіз та опис запропонованої трифазної бездротової системи передачі енергії

У даній роботі запропоновано структуру трифазного з'єднання, яка є більш придатною для застосувань із високою потужністю. ШІМ-сигнал, сформований за допомогою DSP, подається на керуючу частину MOSEFT-

транзисторів трифазного повномостового інвертора для управління вихідною частотою та фазою інвертора. Енергія передається на приймальну котушку, при цьому навантаження на приймальному боці отримує енергію через передавальну котушку. Запропонована в роботі структура значно зменшує об'єм системи та краще підходить для високопотужних додатків. Спочатку описується модель взаємної індуктивності трифазної системи і встановлюється залежність між параметрами цієї моделі. Далі проводиться порівняння різних типів котушок, а параметри системи оптимізуються за допомогою програмного забезпечення для визначення найкращої структури з'єднання. Для перевірки здійсненності та ефективності даної топології був створений експериментальний прототип з вихідною потужністю 200 Вт та робочою частотою 47,5 кГц.

В практичних застосуваннях індуктивність виток та індуктивність збудження бездротової зарядної котушки є досить високими, що призводить до значної індуктивності самої котушки. Це змушує котушку поглинати велику кількість реактивної потужності перед тим, як активна потужність буде передана на навантаження. Внаслідок цього реактивний струм у колі стає значним, що, в свою чергу, призводить до збільшення втрат у перетворювачі. Для вирішення цієї проблеми може бути введена модель компенсаційної мережі, яка усуває реактивний опір в колі передавальної та приймальної сторін, ефективно компенсуючи реактивну потужність, генеровану індуктивною котушкою. Це дозволяє покращити вихідний коефіцієнт потужності системи, підвищити ефективність передачі та оптимізувати потужність навантаження. У цьому розділі основну увагу приділено аналізу топології системи бездротової передачі енергії.

Найпоширеніші схеми компенсації для бездротових котушок зазвичай складаються з чотирьох типів структур топологічної компенсації: типу «S-S» (послідовне з'єднання на обох кінцях), типу «S-P» (послідовне з'єднання на

передавальному кінці та паралельне на приймальному), типу «P-S» (паралельне з'єднання на передавальному кінці та послідовне на приймальному) і типу «P-P» (паралельне з'єднання на обох кінцях), як показано на рисунку 3.1. Важливо зазначити, що в системах передачі лише топології типу «S-S» і «S-P» не дозволяють значенню C_p впливати на опір R_L , а флуктуації R_L на приймальному кінці не впливають на резонансну частоту передавального кінця. Крім того, топологія типу «S-S» здатна витримувати вищу потужність, а також є простою та зручною у реалізації. Це робить її оптимальним варіантом для застосувань з високою потужністю та вимогами до стабільної роботи.

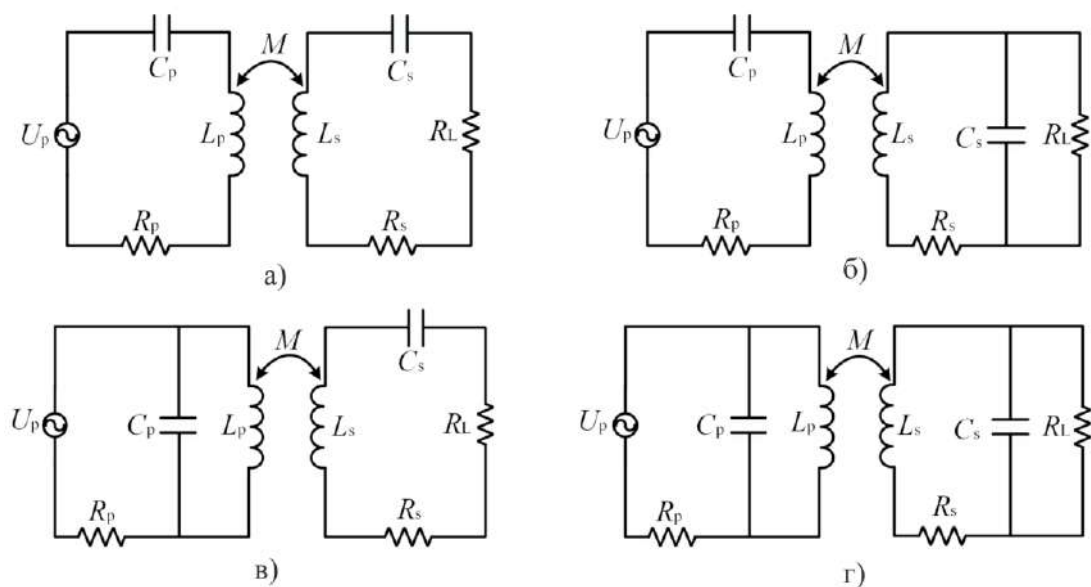


Рисунок 3.1 – Чотири топології резонансного контуру компенсації:

а) тип S-S; б) тип S-P; в) тип S-P; г) Тип P-P

Резонансні контури компенсації є важливою частиною систем бездротової передачі енергії, оскільки вони забезпечують оптимальне з'єднання котушок індуктивності для мінімізації втрат енергії та забезпечення стабільної передачі енергії. На рисунку 3.1 представлені чотири основні топології резонансного контуру компенсації: тип S-S (серія-серія), тип S-P

(серія-паралель), тип P-S (паралель-серія) та тип P-P (паралель-паралель). Кожна з топологій має свої особливості і відповідає різним вимогам до роботи системи. Наприклад, тип S-S найбільш підходить для забезпечення високого коефіцієнта зв'язку, тип P-P оптимізує енергопередачу для великого відстані між передавачем і приймачем, а тип S-P забезпечує високу стабільність виходу з постійною напругою або струмом. Вибір топології резонансного контуру залежить від специфічних вимог до системи WPT і умов її використання.

У випадку трифазної системи бездротової передачі енергії, обрана топологія «S-S» має переваги в забезпеченні балансованої роботи та ефективної компенсації на обох кінцях передачі. Враховуючи ці особливості, трифазна котушка використовує метод підключення «Y-Y», що дозволяє забезпечити рівномірний розподіл напруги і зменшити вплив небажаних резонансних ефектів. Топологія, зображена на рисунку 3.2, була реалізована в рамках досліджень, спрямованих на підвищення ефективності системи передачі енергії за допомогою магнітного резонансу. Завдяки такій реалізації досягається оптимізація взаємодії між передавальними та приймальними котушками, що дозволяє підвищити загальну ефективність системи, зменшуючи втрати потужності і забезпечуючи стабільність роботи при змінних умовах навантаження.

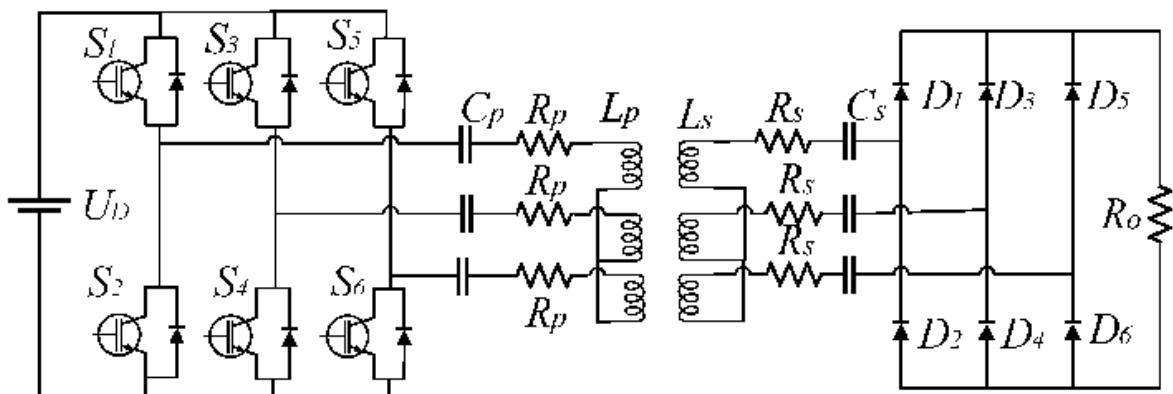


Рисунок 3.2 – Топологія трифазної бездротової системи передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком

Трифазна бездротова система передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком, зображена на рисунку 3.2, є одним з найбільш інноваційних підходів для забезпечення стабільної передачі енергії на великі відстані. Вона використовує три незалежні індуктивні зв'язки, розташовані під кутом 120 градусів один до одного, що дозволяє мінімізувати втрати енергії та покращити ефективність передачі. Кожна індуктивність працює у фазовому режимі, що забезпечує рівномірний розподіл магнітного потоку і зменшує втрати на нагрівання і енергозалежність системи. Така конфігурація дозволяє забезпечити стабільну передачу енергії для складних механічних і електронних систем, що вимагають високої надійності та стабільності.

Топологія трифазної бездротової системи передачі енергії переважно складається з джерела живлення постійного струму, інверторної схеми, механізму трифазного з'єднання та навантаження. Трифазний високочастотний інвертор формується шістьма MOSFET ($S_1 - S_6$), а U_{dc} виступає в ролі джерела вхідної напруги постійного струму. L_p та L_s є власними індуктивностями передавальної та приймальної котушок відповідно, тоді як R_p і R_s – це відповідні опори цих котушок. Компенсаційний конденсатор C_p , який підключається послідовно з L_p на передавальній стороні, а компенсаційний конденсатор C_s підключається послідовно з L_s на приймальній стороні. Повномостовий некерований випрямляч на навантажувальній стороні складається з шести діодів ($D_1 - D_6$). Трифазна котушка реалізує з'єднання Y-Y, а її значення ємності дорівнює

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}, \quad (3.11)$$

де L – індуктивність котушок, $L = L_s = L_p$

На рисунку 3.3 зображена еквівалентна модель бездротової системи передачі енергії з трьома котушками. У цій системі кожна котушка має власну індуктивність і взаємодіє з іншими через магнітне поле, що створює взаємну індуктивність. Згідно з законом Кірхгофа для напруг, можна отримати модель взаємної індуктивності трифазної бездротової зарядної системи, як показано у виразі (3.12), що описує взаємодію електромагнітної індукції між трьома котушками та механізм передачі енергії між ними. Використовуючи цю модель, можна детально дослідити проектування, компонування та керування котушками для досягнення високої ефективності в системі бездротової передачі енергії.

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & j\omega M & j\omega M \\ j\omega M & Z_p & j\omega M \\ j\omega M & j\omega M & Z_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -j\omega M_{x1} & -j\omega M_x & -j\omega M_x \\ -j\omega M_x & -j\omega M_{x1} & -j\omega M_x \\ -j\omega M_x & -j\omega M_x & -j\omega M_{x1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega M_{x1} & j\omega M_x & j\omega M_x \\ j\omega M_x & j\omega M_{x1} & j\omega M_x \\ j\omega M_x & j\omega M_x & j\omega M_{x1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_s & -j\omega M & -j\omega M \\ -j\omega M & -Z_s & -j\omega M \\ -j\omega M & -j\omega M & -Z_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

$$\text{де } Z_p = R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p}, \quad Z_s = (R_s + R_w) + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}.$$

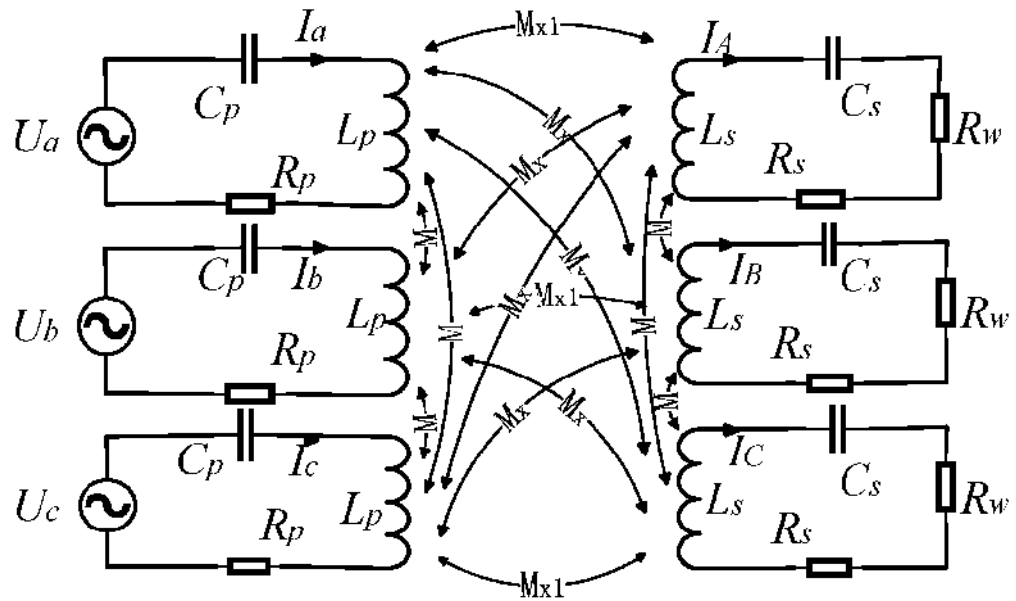


Рисунок 3.3 – Топологія трифазної системи бездротової передачі енергії

Оскільки структура приймальних і передавальних котушок є повністю симетричною, їхня самоіндуктивність також однакова. Для спрощення розрахунків, позначимо L_p і L_s як власні індуктивності передавальної та приймальної котушок відповідно; M_x позначає взаємну індуктивність між котушками приймання або передавання; M_{x1} – взаємну індуктивність між передавальною та приймальною котушками; R_p і R_s відповідають за опір котушок; I_x (де $x = a, b, c, A, B, C$) представляє струми в контурах передавальної та приймальної сторін. Із цієї моделі стає зрозуміло, що конфігурація котушок має значний вплив на рівень взаємної індуктивності та ефективність роботи системи бездротової передачі енергії.

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C}{U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c}. \quad (3.14)$$

Відповідно до виразів (3.12)–(3.14), ефективність передачі енергії котушкою залежить від взаємної індуктивності. Коефіцієнт взаємної індуктивності визначається виключно взаємним розташуванням та розмірами

обмоток. Отже, у даній роботі основна увага приділяється відносному розташуванню та структурним параметрам обмоток для розробки трифазної котушки в бездротовій системі передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком.

3.4 Висновок до третього розділу

У цьому розділі розглянуто теоретичні аспекти та методи покращення характеристик бездротових систем передачі енергії. Зокрема, проведено математичний аналіз коефіцієнта магнітного зв'язку, який є ключовим параметром, що впливає на ефективність енергопередачі. Досліджено особливості роботи однофазних і трифазних систем, а також порівняно їхні характеристики для виявлення переваг трифазних структур у високопотужних додатках.

Окрему увагу приділено опису та аналізу запропонованої трифазної системи передачі енергії, яка базується на топології з покращеними параметрами магнітного зв'язку та мінімізацією втрат. Для підтвердження ефективності розробленої моделі було використано методи математичного моделювання та створено експериментальний прототип системи.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

На сьогодні існує велика кількість різних механізмів з'єднання в системах бездротової передачі енергії. Аналізуючи існуючі варіанти конструкцій котушок, які описані в наукових джерелах, можна зробити висновок, що трифазна котушка забезпечує кращий коефіцієнт зв'язку та значно підвищує ефективність передачі енергії. Це зумовлено тим, що трифазні системи дозволяють зменшити втрати енергії та забезпечити стабільнішу роботу в широкому діапазоні навантажень. Для того, щоб підтвердити ефективність та доцільність використання трифазної котушки, буде проведено симуляційне моделювання. Моделювання дозволить оцінити ефективність енергетичної передачі для різних конфігурацій котушок, а також виявити найбільш оптимальні параметри, які сприятимуть максимальній передачі потужності при мінімальних енергетичних втрат.

4.1 Аналіз магнітного поля та ефективності трифазної котушки методом моделювання

Під впливом струму в котушці створюється магнітне поле, яке описується рівняннями Максвелла, зокрема законом Ампера та законом електромагнітної індукції Фарадея. Закон Ампера в інтегральній формі визначає, що циркуляція магнітного поля вздовж замкненого контуру дорівнює струму, що протікає через цей контур. Це пояснює утворення магнітного поля навколо провідника зі струмом, яке відіграє ключову роль у формуванні взаємної індуктивності між котушками передавача та приймача в системах бездротової передачі енергії.

Закон Фарадея, у свою чергу, описує явище електромагнітної індукції, згідно з яким зміна магнітного потоку через контур індукує в ньому

електрорушійну силу. Це явище є основою роботи магнітно-резонансних систем бездротової передачі енергії, оскільки забезпечує передачу енергії від однієї котушки до іншої через змінне магнітне поле. Важливо зазначити, що швидкість зміни магнітного потоку та якість взаємного зв'язку між котушками визначають ефективність передачі енергії.

Рівняння Максвелла також враховують зв'язок між електричними та магнітними полями, що дозволяє описати хвильові процеси в котушках та середовищі, в якому вони функціонують. У магнітно-резонансних системах, особливо в багатофазних конфігураціях, правильне налаштування параметрів котушок, таких як кількість витків, діаметр, та їхня геометрична взаємна орієнтація, визначає стабільність та ефективність передачі енергії.

Крім того, при моделюванні магнітного поля враховується вплив таких чинників, як наявність феромагнітних матеріалів, електромагнітні втрати та паразитні ефекти (наприклад, вихрові струми). Це дозволяє розробляти системи бездротової передачі енергії з покращеними характеристиками, мінімізуючи втрати енергії та забезпечуючи високу ефективність навіть у складних умовах експлуатації. Таким чином, рівняння Максвелла слугують фундаментальною основою для проектування, аналізу та оптимізації сучасних систем бездротової передачі енергії.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = J \\ B = \mu H, J = \sigma E \end{array} \right., \quad (4.1)$$

де B – це напруженість магнітної індукції у будь-якій точці простору; H – напруженість магнітного поля; J – густина струму, яка визначається як $J = 0$ у повітрі і $J = I/A$ в котушці (де I – струм котушки, а A – площа поперечного

перерізу провідника); E – електрорушійна сила, що наводиться в системі; μ – проникність матеріалу; σ – електропровідність матеріалу. Ці параметри є ключовими для опису електромагнітних процесів у системах бездротової передачі енергії на основі магнітно-резонансного зв'язку, оскільки вони визначають характеристики магнітного поля і його вплив на ефективність передачі енергії.

Рівняння магнітної дифузії між котушками можна отримати на основі рівнянь Максвелла, що описують електромагнітні взаємодії в системі бездротової передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком.

$$\frac{\nabla \times \nabla \times B}{\mu\sigma} + \frac{\partial B}{\partial t} = 0. \quad (4.2)$$

Відповідно до формули $\nabla \times \nabla \times B = \nabla(\nabla \cdot B) - \nabla^2 B$ та враховуючи, що $\nabla \cdot B = 0$ можна вивести рівняння дифузії магнітної індукції B для системи бездротової передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком:

$$-\frac{1}{\mu\sigma} \nabla^2 B + \frac{\partial B}{\partial t} = 0. \quad (4.3)$$

Модель втрат включається до розрахунку ефективності передачі в системі бездротової передачі енергії (WPT), оскільки втрати значно впливають на продуктивність і стабільність системи. Основні втрати зумовлені омичним опором провідників, що спричиняє нагрівання котушок під час протікання струму. Крім цього, до втрат слід враховувати втрати через вихрові струми в провідникових і магнітних матеріалах, а також діелектричні втрати в ізоляційних матеріалах.

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu\sigma} \left(\frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial B_x}{\partial t} \\ \frac{1}{\mu\sigma} \left(\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial B_y}{\partial t} \\ \frac{1}{\mu\sigma} \left(\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial B_z}{\partial t} \end{cases} \quad (4.4)$$

де σ – провідність матеріалу, B_x – компонент густини магнітного потоку по осі x у просторі котушки, B_y – компонент густини магнітного потоку по осі y , а B_z – компонент густини магнітного потоку по осі z . Густину магнітного потоку в просторі можна розрахувати за наведеними раніше формулами.

$$Q = \frac{1}{T} \int_{T_0-T}^{T_0} J \cdot E dt. \quad (4.5)$$

Коли рівняння магнітної дифузії застосовується до котушки зв'язку, воно дозволяє врахувати розподіл магнітного поля у просторі, а також проникність матеріалів. У випадку багатовимірного аналізу, виміри магнітного поля в напрямках x , y та z обчислюються окремо, що дає змогу отримати точнішу картину розподілу втрат і полів у системі. Це є важливим для систем з нерівномірним магнітним зв'язком або значним впливом геометричних факторів.

Крім того, для врахування втрат у моделях магнітного зв'язку застосовуються ефективні методи розрахунку, такі як метод кінцевих елементів (FEM). Цей метод дозволяє моделювати вплив шкірного ефекту, що спричиняє нерівномірний розподіл струму в провідниках і збільшує їхній еквівалентний опір на високих частотах, характерних для WPT. Аналіз втрат також враховує паразитні явища, такі як витoki магнітного поля, які

зменшують взаємну індуктивність між котушками та знижують ефективність передачі енергії.

Додавання компенсаційних елементів, таких як послідовні або паралельні конденсатори, допомагає знизити вплив втрат, збалансовуючи реактивні потоки енергії в системі. Однак оптимальне налаштування таких елементів потребує точного врахування всіх втрат у системі. Таким чином, детальна модель втрат є невід'ємною частиною проектування та оптимізації сучасних систем WPT.

4.2 Метод моделювання трифазної котушки

Для спрощення аналізу методом кінцевих елементів котушка Літца була представлена у вигляді багатожильної зосередженої котушки в моделюванні. Такий підхід дозволяє ефективно зменшити складність деталей, зберігаючи при цьому основні електромагнітні характеристики системи. Спрощений метод особливо корисний при розробці механізмів з'єднання, оскільки він допомагає знизити обчислювальні витрати, не втрачаючи точності.

Конкретні параметри, використані для порівняння в моделюванні, наведені в таблиці 4.1. Відстань D представляє собою простір між передавальною та приймальною котушками. R – це діаметр круглої котушки або довжина сторони квадратної котушки, тоді як r – радіус дроту. Процес моделювання описується наступним чином:

1. У структурі нової моделі обирається тривимірний простір, після чого, відповідно до необхідних фізичних величин, визначається відповідне поле контуру та середовище магнітного поля.
2. Геометрична модель проектується та будується на основі елементів бездротової системи передачі енергії.
3. Встановлюються властивості матеріалів: котушка вибирається з міді,

екрануючий матеріал – ферит, а зазор – повітря.

4. Для системи встановлюються граничні умови та початкові значення, щоб додати джерело збудження: вхідні межі та обчислення втрат вводяться в котушку, а також задаються властивості магнітного поля екрануючого матеріалу.

5. Схема підключається до опції фізичного поля, після чого до неї додаються резистор і конденсатор джерела живлення. Переферійна схема системи будується шляхом з'єднання вузлів відповідно до топології, наведеної на рисунку 2.





6. Сітка моделі розбивається, і автоматично генерується відповідно до параметрів фізичного поля в моделі. Розмір одиниці обирається як умовний, а контур і магнітне поле визначаються як елементи внеску.

7. Вибирається відповідний розв'язувач для проведення обчислень, а також визначаються фізичні величини, які потрібно виміряти, після чого результати обчислень відображаються.

Параметри моделювання в наведені в таблиці 4.1.

У зазначеному вище моделюванні потужність залишається сталою, а втрати в котушках враховуються при розрахунку їх ефективності. Основні втрати виникають через тепловий опір, що відображено у виразі (4.5). Результати свідчать про те, що структура з кількома котушками є більш ефективною в порівнянні з одною котушкою при передачі однакової потужності. Зокрема, ефективність передачі енергії від трифазної котушки в кільцевому розміщенні є вищою, ніж у котушки подвійної D квадратури (DDQ), а ефективність передачі від трифазної кільцевої обмотки, що перебивається, помітно перевищує показники одношарової котушки.

Таблиця 4.1 – Порівняння структури та характеристик котушки бездротової системи передачі енергії

Структура котушки	Одиночна котушка	Котушка DDQ	Трифазна котушка	Трифазна котушка перекриття
Структура котушки				
Діаметр дроту r	2 мм	2 мм	2 мм	2 мм
Зовнішній діаметр R	150 мм	150 мм	150 мм	150 мм
Кількість витків n	10	10	10	10
Індуктивність L	80 мкГн	80 мкГн	80 мкГн	80 мкГн
Екрануюча конструкція	400×400 мм ²	400×400 мм ²	400×400 мм ²	400×400 мм ²
Відстань котушки D	100 мм	100 мм	100 мм	100 мм
Частота f	47,5 кГц	47,5 кГц	47,5 кГц	47,5 кГц
ККД η	93,67%	94,89%	95,12%	96,49%

Одночасно проведено симуляцію горизонтального зсуву для трьох типів котушок: однієї котушки, котушки подвійної D-квадратури (DDQ) та трифазної перекриваючої котушки. Результати симуляції представлені на рисунку 4.1 при відстані передачі енергії в 100 мм. У разі бічного зсуву ефективність однієї котушки демонструє швидке зниження через втрату магнітного зв'язку між передавальною і приймальною котушками, що обмежує її застосування в умовах високої мобільності або зсуву. Натомість ефективність котушки DDQ та трифазної котушки знижується більш

поступово, що свідчить про їхню адаптованість до умов зі зміщенням між котушками.

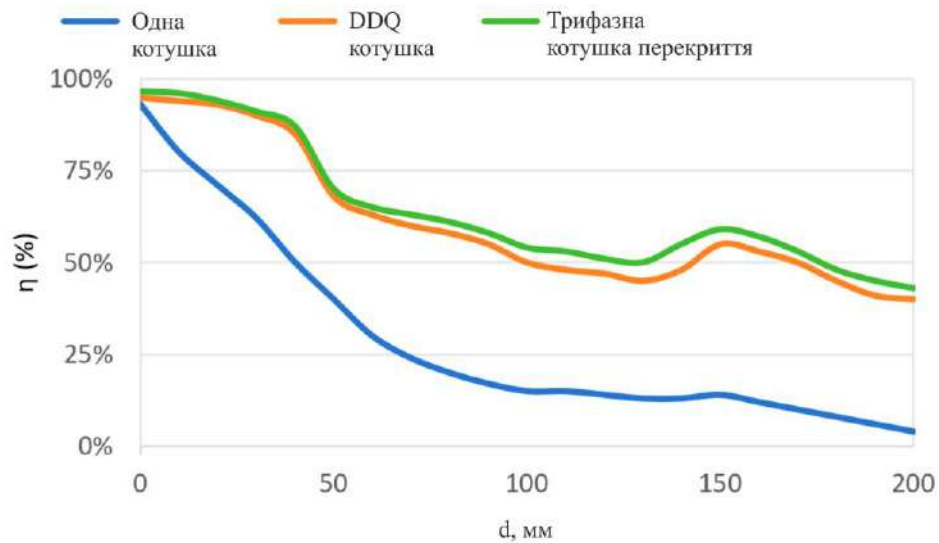


Рисунок 4.1 – Моделювання впливу горизонтального зсуву на ефективність котушки в системі бездротової передачі енергії ($D = 100$ мм)

Порівняльний аналіз показує, що загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) трифазної котушки перевищує ККД котушки DDQ. Це обумовлено більш рівномірним розподілом магнітного поля і меншою чутливістю до зміщення між котушками. Ба більше, у разі відхилення від центрального радіуса передачі енергії загальний ККД трифазної котушки має тенденцію до незначного збільшення. Це пояснюється перекриваючим і симетричним механізмом зв'язку між фазами, який мінімізує втрати магнітного потоку та покращує стабільність передачі.

У даній роботі запропоновано інноваційний перекриваючий та симетричний механізм зв'язку для трифазної котушки, що забезпечує підвищену ефективність та стійкість до зміщення у стаціонарному режимі. Такий підхід дозволяє оптимізувати магнітний зв'язок між котушками за різних умов вирівнювання, що є особливо актуальним для динамічних систем бездротової передачі енергії, наприклад, зарядки електромобілів під час руху.

Проведений аналіз підтверджує доцільність використання трифазної котушки для забезпечення високої ефективності передачі енергії навіть за умов зсуву, що робить її перспективною для широкого спектру застосувань.

Додатково, симуляції показали, що при використанні трифазної котушки вдається мінімізувати вплив паразитних явищ, таких як витоки магнітного потоку, а також зменшити чутливість до асиметричних навантажень. Це відкриває можливості для подальшого вдосконалення конструкцій котушок у магнітно-резонансних системах WPT.

У сучасних системах бездротової передачі енергії особливу увагу приділяють розробці конструкцій котушок, які забезпечують високу ефективність передачі, стійкість до зміщень та мінімізацію втрат. Трифазні системи зарядки демонструють значний потенціал у цих аспектах завдяки рівномірному розподілу магнітного потоку та стабільній роботі навіть за умов зміщення котушок. Застосування симетричних конструкцій із правильно розрахованими параметрами дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії (ККД) та забезпечити ефективну взаємодію між фазами. У цьому контексті дослідження оптимальних моделей взаємної індуктивності є ключовим завданням для розробки вдосконалених магнітно-резонансних систем бездротової зарядки, особливо для динамічних застосувань, таких як зарядка електромобілів у русі.

У цьому дослідженні котушки розташовані у формі кола та мають повністю симетричну конструкцію. Порівняно з наявними системами з трьома котушками, структура, представлена в даній роботі, є більш оптимізованою. Взаємна індуктивність між котушками також демонструє повну симетрію, що спрощує аналіз і розрахунки моделі взаємної індуктивності. Остаточна оптимальна модель взаємної індуктивності була розроблена шляхом детального вивчення кута перекриття та відстані між котушками в трифазній системі бездротової зарядки з трьома котушками. Розмах кожної фазної

катушки в моделі становить 180 градусів, а різниця кутів між трьома фазами дорівнює 120 градусів. Структурну схему наведено на рисунку 4.2.

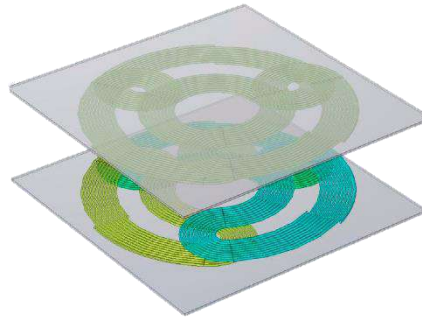


Рисунок 4.2 – Модель механізму з'єднання трифазної системи бездротової передачі енергії

Модель механізму з'єднання трифазної системи бездротової передачі енергії, зображена на рисунку 4.2, демонструє принцип передачі енергії між передавачем і приймачем через індуктивні зв'язки. Кожна індуктивність об'єднана з відповідною частиною системи передачі, що дозволяє забезпечити стабільне і рівномірне розподілення магнітного потоку між передавальною і приймальною стороною. Така конфігурація підвищує ефективність передачі енергії, знижуючи втрати і забезпечуючи надійну роботу системи в умовах змінного повітряного зазору та зміщення між компонентами.

У роботі також проводиться детальний аналіз розподілу електричних і магнітних полів між однофазними та трифазними катушками, що є ключовим для визначення їхньої ефективності, стабільності та придатності для різних застосувань. Параметри моделювання, включаючи геометрію катушок, матеріали, частоту роботи та відстань між катушками, представлені в таблиці 4.1. Ці дані є базою для точного відтворення реальних умов роботи системи бездротової передачі енергії.

Результати моделювання, що відображають режим електричного поля у трифазній системі, наведені на рисунку 4.3. Аналіз показує, що трифазна

котушка рівномірно розподіляє струм між плечима мосту, що дозволяє зменшити ефективне значення струму, яке проходить через кожну фазу, порівняно з однофазною котушкою. Завдяки зниженню струму зменшується напруга на котушці, що не лише підвищує енергоефективність, але й знижує втрати потужності, викликані нагріванням.

Рівномірний розподіл струму між фазами трифазної котушки зменшує локальні перевантаження та струмове навантаження, забезпечуючи більш стабільну роботу системи. Це особливо важливо для застосувань високої потужності, таких як зарядка електромобілів чи промислових пристроїв, де надійність і довговічність є критичними. Трифазна конструкція також сприяє зниженню магнітних перешкод (ЕМІ), оскільки створює більш збалансований магнітний потік.

Таким чином, трифазна система не лише покращує енергетичні показники, але й значно підвищує надійність та термін експлуатації компонентів. Це робить її ефективним рішенням для бездротових зарядних станцій високої потужності, особливо в умовах змінних навантажень або складних експлуатаційних середовищ.

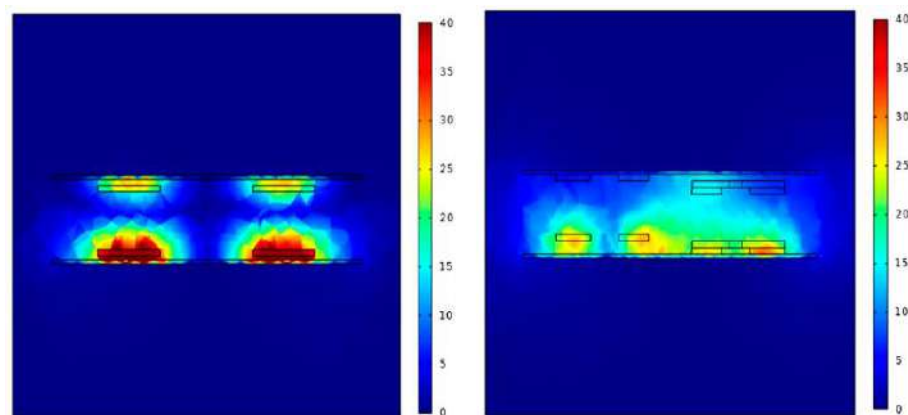


Рисунок 4.3 – Порівняння результатів моделювання електричного поля в моделі механізму з'єднання котушки системи бездротової передачі енергії

На рисунку 4.3 представлені результати моделювання електричного поля

для механізмів з'єднання котушки в системах бездротової передачі енергії. Порівняльний аналіз демонструє значну перевагу трифазної конструкції над однофазною з точки зору рівномірності розподілу поля та зменшення локальних концентрацій струму. Завдяки цьому знижується ймовірність перегріву, покращується стабільність роботи системи та забезпечується ефективніше використання енергії. Крім того, у трифазній системі створюється більш гармонійний розподіл магнітного потоку, що зменшує втрати та електромагнітні перешкоди, особливо в умовах нерівномірного навантаження або зміщення між передавальною та приймальною котушками. Ці переваги підтверджують доцільність використання трифазних систем для сучасних високопотужних бездротових зарядних станцій.

На рисунку 4.4 представлені результати моделювання магнітного поля та щільності магнітного потоку в механізмі з'єднання трифазної секторної котушки під час роботи при напрузі 220 В і частоті 47,5 кГц. Ця конструкція дозволяє досягти високої щільності обмотки в обмеженому просторі, що важливо для ефективної бездротової передачі енергії. Порівняння з однофазною котушкою показує, що трифазна конструкція має відносно сильніше магнітне поле та менший витік магнітного потоку. Ці характеристики роблять трифазну котушку більш потужною і оптимізованою для бездротової передачі енергії, забезпечуючи кращу ефективність передачі потужності.

Зсув трифазних струмів на 120 градусів створює обертове магнітне поле в трифазній котушці, що робить її менш чутливою до точного вирівнювання між передавачем і приймачем. Така гнучкість є важливою перевагою в умовах нерівномірного розташування або зміщення між передавальною та приймальною котушками. Це підвищує ефективність системи, дозволяє кращу адаптацію до різних умов встановлення і забезпечує надійну передачу енергії навіть при відхиленнях від оптимального положення.

Ефективність передачі трифазної котушки досягає 96,49%, що значно перевищує ефективність однофазної котушки, яка становить лише 93,67% за тих же умов. Це збільшення ефективності передачі потужності на 2,82%, що є суттєвим кроком до підвищення загальної ефективності системи бездротової передачі енергії. Завдяки більш вираженій щільності магнітного потоку в робочій зоні між трьома котушками, ця конструкція дозволяє зменшити обсяг котушки і підвищити компактність та ефективність обладнання.

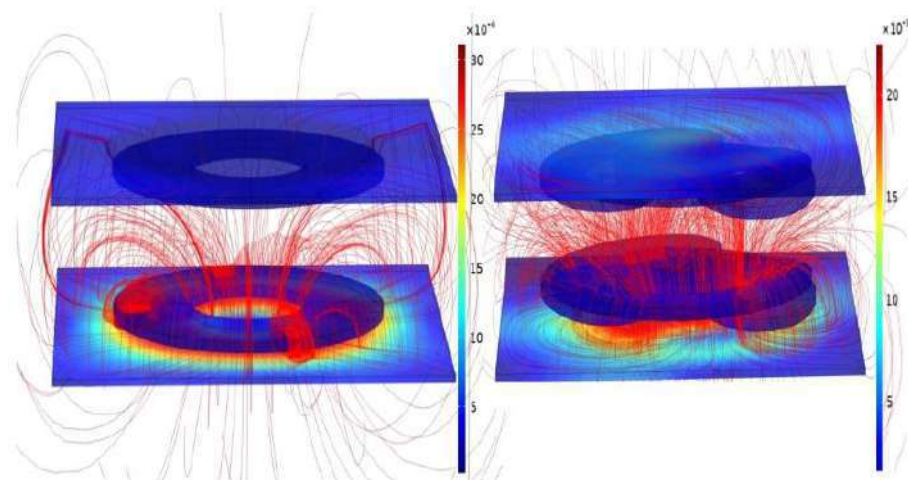


Рисунок 4.4 – Порівняння режимів магнітного поля та ліній щільності магнітного потоку в моделі з'єднання системи бездротової передачі енергії

Отже, на рисунку 4.4 показані результати моделювання магнітного поля та ліній щільності магнітного потоку в механізмі з'єднання системи бездротової передачі енергії. Трифазна секторна котушка продемонструвала високий рівень ефективності, знижений витік магнітного потоку та сильніше магнітне поле порівняно з однофазними котушками. Це робить її ідеальним вибором для забезпечення надійної передачі енергії навіть у випадках нерівномірного розташування або зміщення між передавальною та приймальною котушками.

4.3 Моделювання в програмному забезпеченні Simulink

Для детального оцінювання роботи трифазної бездротової системи передачі енергії та оптимізації її параметрів була створена імітаційна модель системи у Simulink. Як показано на рисунку 4.5, модель включає джерело живлення постійного струму, інвертор, механізм трифазного з'єднання та навантаження. Джерело постійного струму забезпечує вхідну потужність, а інверторна схема перетворює постійний струм у високочастотний сигнал, необхідний для бездротової передачі. Трифазний механізм зв'язку моделює процес передачі енергії безпосередньо від передавача до приймача через електромагнітне поле. Навантаження відтворює електричне обладнання на приймальному кінці, що дозволяє оцінити ефективність передачі енергії за реальних умов використання.

Використання Simulink дозволяє точно імітувати функціонування системи, контролювати та оптимізувати різні параметри системи, такі як частота, амплітуда сигналу, взаємна індуктивність між котушками і взаємодія між ними. Це дозволяє досягти максимальної ефективності передачі енергії, знижуючи втрати і забезпечуючи стабільну та надійну роботу системи. Крім того, моделювання у Simulink надає можливість виявити критичні точки у системі та вчасно вжити заходів для їхнього усунення. Це середовище моделювання є важливим інструментом для проведення повноцінного тестування та перевірки системи перед її впровадженням, що забезпечує підвищену точність і надійність конструкції.

Рисунок 4.5 демонструє імітаційну модель, яка включає джерело живлення постійного струму, інвертор, трифазний механізм зв'язку та навантаження. Джерело постійного струму забезпечує вхідну потужність, а інвертор перетворює постійний струм у високочастотний сигнал, необхідний для бездротової передачі енергії.

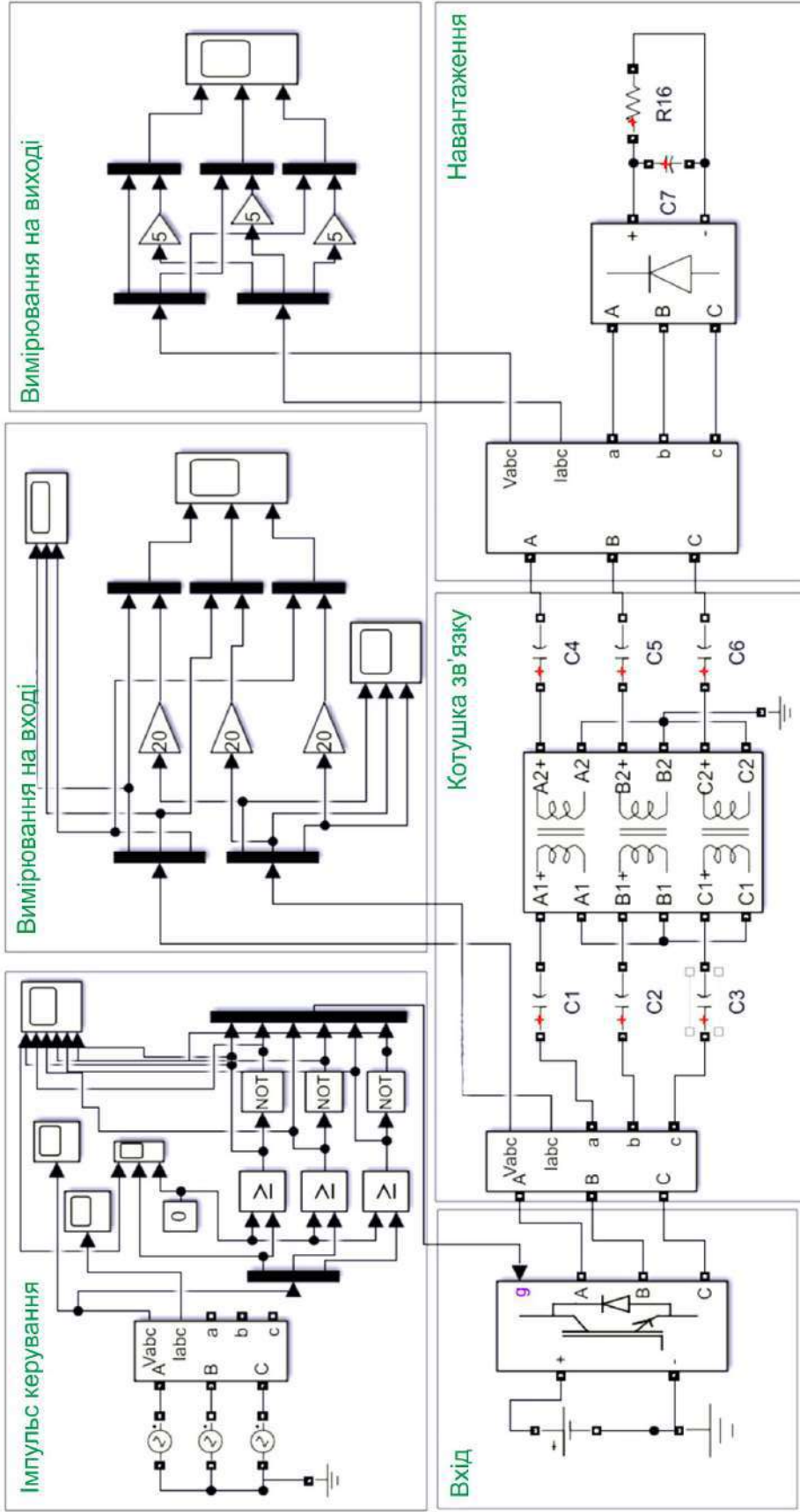


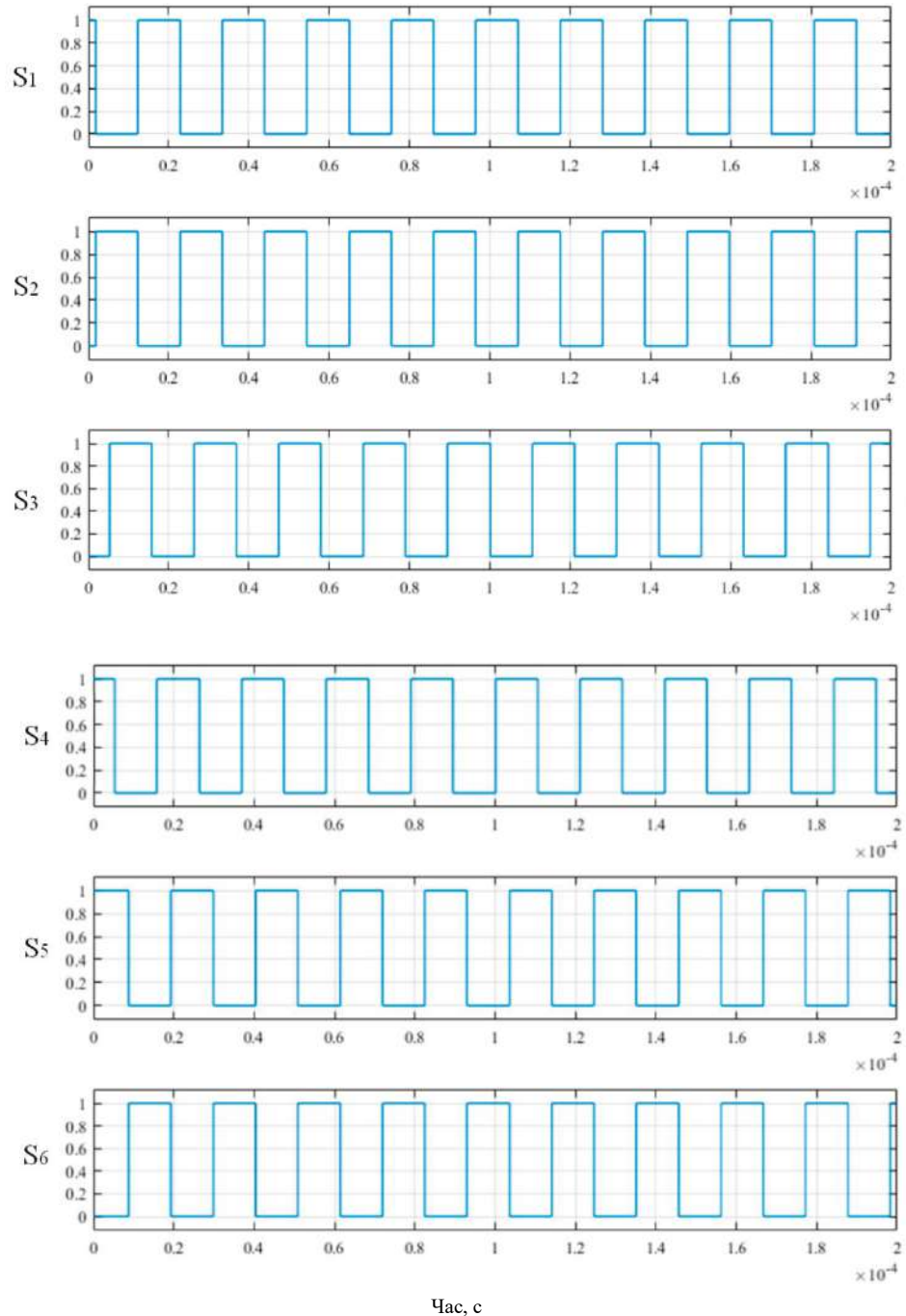
Рисунок 4.5 – Імітаційна модель в середовищі Simulink

Трифазний механізм зв'язку моделює процес передачі енергії від передавача до приймача через електромагнітне поле. Навантаження імітує електричне обладнання на приймальному кінці, дозволяючи оцінити ефективність передачі енергії в реальних умовах використання. Використання Simulink дозволяє налаштовувати і оптимізувати різні параметри системи, такі як частота, амплітуда сигналу та розташування котушок, для досягнення максимальної ефективності передачі енергії. Це середовище моделювання є незамінним інструментом для повноцінного тестування та перевірки системи перед її впровадженням, що забезпечує високу точність і надійність конструкції.

Керуючий імпульс інверторного модуля не враховує сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) з коефіцієнтом заповнення 50% та частотою 47,5 кГц. Фазовий зсув між трьома фазами модуляції складає 120 градусів. На рисунку 4.6 зображено сигнал ШІМ трифазного інвертора. Чітко видно, що імпульсні сигнали верхньої та нижньої гілок кожної фази є додатковими: коли одна гілка ввімкнена, інша вимкнена. Це зроблено для запобігання короткому замиканню і пошкодженню компонентів системи. Через наявність часу розряду комутаційної трубки, після вимкнення однієї гілки необхідно почекати певний час, щоб переконатися в повному розряді перед вмиканням іншої гілки. Інакше одночасне ввімкнення обох гілок може спричинити коротке замикання.

Для уникнення такої ситуації вводиться «час затримки між перемикаваннями», під час якого друга гілка вмикається лише після повного розряду першої. У цій конструкції паузу між перемикаваннями встановлено на рівні 600 нс, що є достатнім для повного розряду комутаційної трубки, забезпечуючи безпеку та надійність роботи системи. Водночас час затримки повинен враховувати як ефективність, так і швидкість відгуку системи. Мінімізація часу затримки є критичною для підвищення загальної продуктивності системи. Занадто довга затримка може призвести до втрат ефективності, зниження швидкості відгуку та можливого зниження

ефективності передачі енергії. Оптимізація часу затримки дозволяє мінімізувати затримки, забезпечуючи при цьому безпеку і надійність роботи, що в кінцевому підсумку підвищує загальну продуктивність і стабільність системи.



Рисуну 4.6 – Форма хвилі широтно-імпульсного сигналу керування інвертором

Крім того, ефективна робота інвертора залежить від точності управління сигналами ШІМ та фазовим зсувом між фазами. Недостатній час розрядки комутаційних трубок може призвести до зниження ефективності роботи інвертора, що відображається у зменшенні ефективності передачі енергії. У трифазній системі, де кожна фаза повинна працювати синхронно і безперервно, важливо забезпечити точну і злагоджену роботу кожної гілки інвертора. Регулювання часу затримки дозволяє зменшити споживану потужність і втрати, покращуючи загальну ефективність системи. Це особливо важливо для високочастотних інверторів, де навіть незначні відхилення можуть мати значний вплив на якість сигналу і, відповідно, на ефективність бездротової передачі енергії.

На рисунку 4.6 показана форма хвилі широтно-імпульсного сигналу керування інвертором для трифазного з'єднання. Чітке чергування імпульсів верхньої та нижньої гілок кожної фази дозволяє запобігти короткому замиканню і забезпечити стабільну роботу системи. Важливо, що фазовий зсув у 120 градусів між трьома фазами ШІМ сигналу дозволяє зберігати синхронність роботи інвертора, що є критичним для ефективності передачі енергії.

Для наближення моделювання до реальних умов дослідження, електричні параметри та розміри, використані в симуляційному аналізі Simulink, були узгоджені з експериментальними умовами. Тому такі параметри, як індуктивність котушки та ємність резонансного конденсатора, використані в моделі Simulink, наведені в таблиці 4.2.

Як висновок до таблиці 4.2, слід зазначити, що узгоджені електричні параметри та розміри, використані в симуляційному аналізі Simulink, дозволяють більш точно моделювати реальні умови роботи системи бездротової передачі енергії. Це забезпечує більш достовірні результати, що є ключовими для оцінки ефективності та стабільності системи в реальних умовах.

Таблиця 4.2 – Параметри моделювання матричного перетворювача системи бездротової передачі енергії у середовищі Simulink

Параметр	символ	Значення
Фазова напруга живлення	U_i	220 В
Частота перемикавання	f	47,5 кГц
Опір навантажень	R_0	10 Ом
Котушка самоіндукції	L_p, L_s	31 мкГн
Резонансний конденсатор	C_p, C_s	360 нФ
Зразок часу	t	0,1 мкс

На рисунку 4.7 наведено форму сигналу напруги та струму на виході системи. Напруга має прямокутну форму, з коефіцієнтом заповнення позитивних і негативних імпульсів, рівним 1/3, що відповідає часу увімкнення відповідної гілки, керованої керуючим сигналом. Оскільки котушка діє як індуктивний елемент у колі, між напругою і струмом виникає фазовий зсув. Сигнал струму має синусоїдальну форму, що свідчить про здатність системи ефективно перетворювати постійну напругу у змінний струм із стабільною фазовою кореляцією між напругою і струмом. Трифазна вхідна система працює по черзі, забезпечуючи стабільність та надійність роботи. У реальних застосуваннях така трифазна система може ефективно балансувати силові навантаження, зменшувати коливання напруги та гармонійні спотворення струму, а також покращувати якість електроенергії.

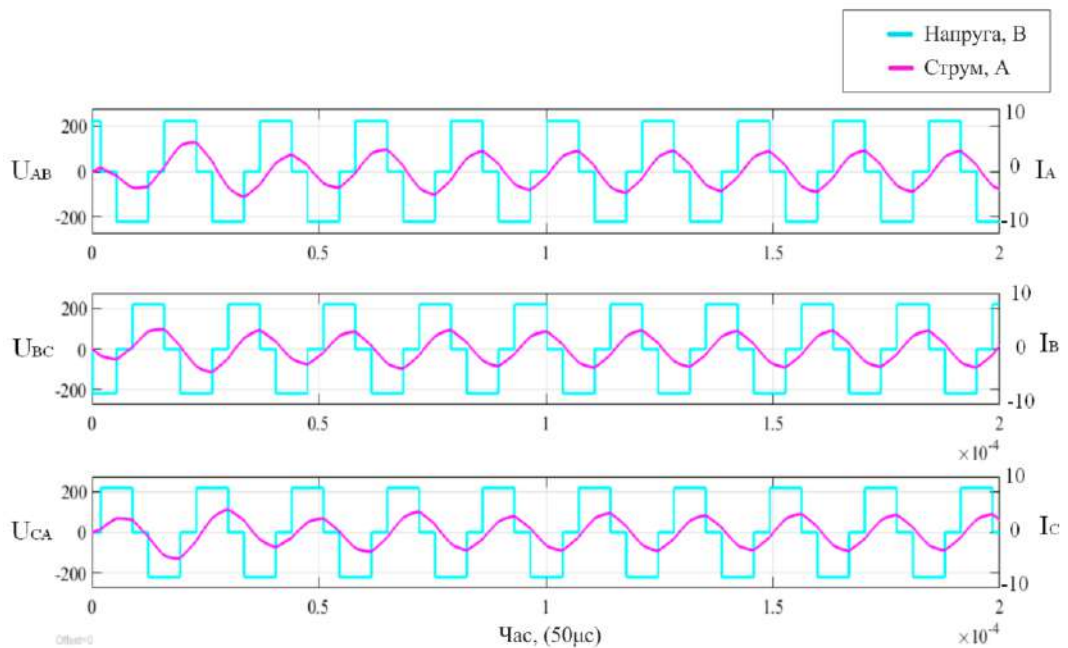


Рисунок. 4.7 – Форма сигналу напруги та струму на вхідній лінії трифазного передавача

Ця трифазна система на виході демонструє стабільне синусоїдальне формування струму, що забезпечує ефективне та надійне перетворення енергії. Завдяки черговому включенню фаз, система здатна зменшити імпульсні навантаження на кожну котушку, що сприяє покращенню загальної стабільності та надійності системи. Крім того, чітке співвідношення між напругою і струмом дозволяє зменшити гармонійні спотворення та коливання напруги, що є важливим для забезпечення високої якості електроенергії у реальних застосуваннях.

Симуляційна форма хвилі для напруги та струму на виході приймального вузла з частотою 47,5 кГц, представленого на рисунку 4.8, дозволяє оцінити роботу трифазного моста в реальних умовах моделювання. Результати показують стабільну синусоїдальну форму вихідного струму з періодом одного циклу, що становить 21 мікросекунду. Це підтверджує ефективність реалізованої стратегії управління, яка базується на принципах широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

На рисунку 4.8 представлено симуляційну форму хвилі для напруги та струму на виході приймального вузла з частотою 47,5 кГц, отриману в середовищі моделювання. Результати демонструють, що плечі трифазного моста працюють по черзі, забезпечуючи стабільну синусоїдальну форму вихідного струму з періодом одного циклу, який становить 21 мкс. При збільшенні масштабу можна помітити, що форма сигналу вихідної напруги відповідає принципам широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що підтверджує правильність реалізованої стратегії управління.

Додатково аналіз показав, що фаза вихідного струму переважно співпадає з фазою вихідної напруги, що свідчить про високий коефіцієнт потужності системи. Це є надзвичайно важливим фактором для бездротових систем передачі енергії, оскільки високий коефіцієнт потужності дозволяє не лише підвищити ефективність передачі, але й зменшити втрати енергії на нагрівання компонентів.

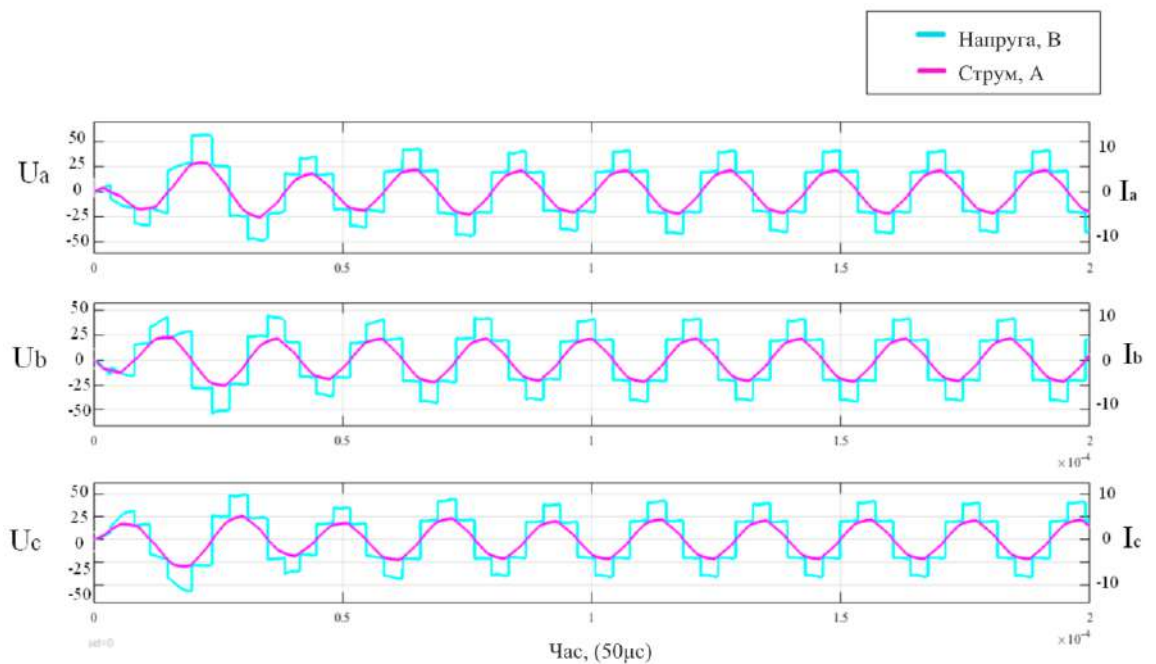


Рисунок 4.8 – Форма вихідної фазної напруги та струму на приймальному кінці

Ці результати демонструють, що завдяки оптимізованому фазовому зсуву та стратегічному управлінню широтно-імпульсною модуляцією, трифазна

бездротова система передачі енергії досягає високого коефіцієнта потужності. Такий підхід дозволяє не тільки знизити втрати енергії на нагрівання компонентів, але й забезпечити стабільну та надійну роботу системи, зберігаючи ефективність передачі енергії навіть при змінних умовах навантаження.

Окрім цього, симуляція підтвердила, що обрана топологія схеми трифазної системи забезпечує рівномірний розподіл електромагнітного поля в приймальному вузлі, мінімізуючи вплив коливань напруги та струму на працездатність системи. Це сприяє стабільній роботі системи навіть за змінних умов повітряного зазору або навантаження, що є критично важливим для високопотужних застосувань, таких як заряджання електромобілів чи живлення промислового обладнання.

4.7 Висновок до четвертого розділу

У цьому розділі представлено результати експериментальних досліджень та моделювання ефективності магнітно-резонансних систем передачі енергії. Зокрема, проаналізовано магнітне поле та ефективність роботи трифазної котушки, яка використовується у системах бездротової передачі енергії, з використанням чисельного моделювання. Описано методику моделювання трифазної котушки, включаючи спрощення геометрії для зменшення обчислювальної складності без втрати точності результатів. Окрему увагу приділено моделюванню у спеціалізованому програмному забезпеченні, яке дозволяє оцінити роботу системи в умовах реального навантаження та провести оптимізацію її параметрів для досягнення максимальної ефективності.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломної роботи було розроблено, змодельовано та оптимізовано трифазну систему бездротової передачі енергії, яка забезпечує значне підвищення ефективності передачі порівняно з однофазними системами. Проведене дослідження підтвердило актуальність використання трифазних рішень для усунення обмежень традиційних однофазних систем, зокрема низької потужності передачі, невисокої ефективності та високих навантажень у колі.

Результати роботи дозволили досягти наступних цілей і вирішити поставлені завдання:

- створено чисельну багатофізичну модель для аналізу характеристик трифазної системи бездротової передачі енергії. Модель включає магнітні, електричні та теплові аспекти, що дозволило провести всебічний аналіз топології системи, визначити оптимальні параметри конструкції котушок зв'язку та резонансної компенсаційної мережі.

- на основі моделювання було вдосконалено геометрію котушок зв'язку та параметри резонансної мережі. Завдяки цьому досягнуто рівномірного розподілу магнітного потоку, мінімізації втрат енергії та зниження напруги в контурі. Трифазна система, завдяки фазовому куту 120 градусів між магнітними потоками, забезпечує вищий рівень енергетичної ефективності, ніж однофазна.

Експериментальні дослідження підтвердили, що на резонансній частоті 47,5 кГц система демонструє: зменшення втрат магнітного потоку; значне підвищення ефективності передачі енергії (більше 85%); суттєве зменшення напруги в контурі.

Проведено аналіз та порівняння трифазної та однофазної систем у рівних умовах повітряного зазору, робочої частоти та навколишнього середовища. Трифазна система показала кращу стабільність передачі енергії,

меншу залежність від змін у геометрії системи, більшу робочу відстань між передавальною та приймальною частинами та підвищену енергоефективність.

У роботі вперше запропоновано і досліджено трифазну систему бездротової передачі енергії з оптимізованою резонансною компенсаційною мережею. Застосування багатофізичного підходу до аналізу дозволило визначити найбільш ефективні параметри для практичної реалізації трифазної системи.

Результати роботи мають високу прикладну цінність. Запропонована трифазна система може бути використана для покращення енергетичних характеристик бездротових зарядних пристроїв, зокрема для електромобілів, робототехнічних систем, споживчої електроніки та медичних імплантатів. Впровадження цієї технології дозволить зменшити втрати енергії, підвищити стабільність передачі, зменшити розміри і вартість обладнання, а також забезпечити безпечніші умови експлуатації.

Розробка та впровадження трифазних систем сприятиме зменшенню використання кабелів, що забезпечить більшу екологічність та спростить обслуговування енергетичних систем. Це, у свою чергу, дозволить знизити витрати на інфраструктуру, що є важливим фактором у сучасній економіці.

Результати досліджень підтверджують, що трифазна система бездротової передачі енергії значно перевершує однофазні аналоги за показниками ефективності, стабільності та надійності. Використання запропонованих підходів відкриває нові можливості для розвитку систем бездротового енергопостачання, які відповідають сучасним технологічним викликам.

Стаття, опублікована за результатами роботи, підтверджує наукову та практичну значущість, сприяючи подальшому розвитку досліджень у галузі бездротової передачі енергії та магнітно-резонансних технологій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Nikola Tesla, “High frequency oscillators for electro-therapeutic and other purposes”, The Electrical Engineer. Vol. XXVI. November 17, 1898. No. 550.
2. Nikola Tesla, “Transmission of electrical energy without wire”, Electrical World and Engineer, March 5, 1904 [online] www.tfcbooks.com/tesla/
3. M. Hutin and M. Leblanc, “Transformer system for electric railways”, US patent 527 857, Oct. 23, 1894
4. “Nikola Tesla 1857 – 1943”, May 1943, Proceedings of the I.R.E., pp: 194
5. R. Lomas, “The Man Who Invented the Twentieth Century – Nikola Tesla – Forgotten Genius of Electricity”, U.K., Headline Book Publishing, 1999
6. Nikola Tesla, “On light and other high frequency phenomena”, Lecture Delivered before the Franklin Institute, Philadelphia, February 1893, and before the National Electric Light Association, St. Louis, March 1893. [online] www.tfcbooks.com/tesla/
7. Гаврилюк, В. М., Бондар, С. В. Магнітно-резонансні технології бездротової передачі енергії: сучасний стан та перспективи розвитку. Київ: Вид-во НТУУ «КПІ», – 2017
8. Іваненко, О. О., Петров, І. В. Аналіз та оптимізація бездротових систем передачі енергії. Електротехніка та енергетика, 3(25), 43-50, – 2018
9. Шевчук, В. М., Черниш, В. В. Бездротові системи передачі енергії в умовах магнітно-резонансного зв'язку: Теорія та практика. Харків: ХНУРЕ, – 2020
10. Сидоренко, А. М. Розробка і дослідження трифазних систем бездротової передачі енергії. Журнал електротехнічних та інформаційних технологій, 2(56), 68-74, – 2016
11. Павленко, В. В., Литвиненко, Ю. О. Експериментальні дослідження ефективності магнітно-резонансних систем передачі енергії для електричних транспортних засобів. Технології енергозбереження та енергоефективності, 4(23), 92-98, – 2019

12. Мельник, О. С., Терещенко, В. І. Інноваційні підходи до підвищення ефективності магнітно-резонансних систем передачі енергії. Науково-технічний вісник, 10(3), 45-52, 2021
13. Остренко, Т. І. Трифазні бездротові системи передачі енергії для високопотужних застосувань: аналіз та оптимізація. Міжнародний науковий вісник, 8(45), 102-110, 2020
14. Ковальчук, О. С., Ярмоленко, С. В. Методи оптимізації конструкції котушок зв'язку для магнітно-резонансних бездротових систем. Київ: Наукова думка, 2018
15. Воронін, І. С., Бондаренко, М. М. Програмне моделювання бездротових систем передачі енергії з використанням COMSOL: теоретичний та практичний підходи. Журнал електроніки та зв'язку, 7(35), 33-38, 2019
16. Соколова, В. І. Перспективи розвитку бездротових технологій для електричних транспортних засобів: аналіз, моделювання та експеримент. Вісник наукових досліджень, 1(60), 75-80, 2022
17. C. T. Rim and C. Mi, *Wireless Power Transfer for Electric Vehicles and Mobile Devices*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2017.
18. S. Y. R. Hui, W. Zhong, and C. K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4500–4511, Sep. 2014.
19. K. T. Chau, *Electric Vehicle Machines and Drives – Design, Analysis and Application*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2015.
20. G. A. Covic and J. T. Boys, "Inductive power transfer," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1276–1289, Jun. 2013.
21. I. Mayordomo, T. Drager, P. Spies, J. Bernhard, and A. Pflaum, "An overview of technical challenges and advances of inductive wireless power transmission," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1302–1311, Jun. 2013.
22. C. Qiu, "Design, analysis and application of dynamic wireless power transfer," Ph.D. dissertation, Univ. Hong Kong, Hong Kong, 2016.

23. Z. Zhang, "Energy cryptography for wireless charging of electric vehicles," in *Energy Systems for Electric and Hybrid Vehicles*. Herts, U.K.: Inst. Eng. Technol., 2016, ch. 11, pp. 319–417.
24. Y. H. Sohn, B. H. Choi, E. S. Lee, G. C. Lim, G. H. Cho, and C. T. Rim, "General unified analyses of two-capacitor inductive power transfer systems: Equivalence of current-source SS and SP compensations," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6030–6045, Nov. 2015.
25. J. Zhang, X. Yuan, C. Wang, and Y. He, "Comparative analysis of two-coil and three-coil structures for wireless power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 1, pp. 341–352, Nov. 2017.
26. A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 84–86, 2007.
27. S. Cheon, Y.-H. Kim, S.-Y. Kang, M. L. Lee, J.-M. Lee, and T. Zyung, "Circuit-model-based analysis of a wireless energy-transfer system via coupled magnetic resonances," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 7, pp. 2906–2914, Jul. 2011.
28. J. Dai and D. C. Ludois, "Single active switch power electronics for kilowatt scale capacitive power transfer," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 315–323, Mar. 2015.
29. S. K. Mishra, R. Adda, S. Sekhar, A. Joshi, and A. K. Rathore, "Power transfer using portable surfaces in capacitively coupled power transfer technology," *IET Power Electron.*, vol. 9, no. 5, pp. 997–1008, 2016.
30. C. Liu, A. P. Hu, G. A. Covic, and N. C. Nair, "Comparative study of CCPT systems with two different inductor tuning positions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 294–306, Jan. 2012.
31. K. Lu, S. K. Nguang, S. Ji, and L. Wei, "Design of auto frequency tuning capacitive power transfer system based on class-E2 dc/dc converter," *IET Power Electron.*, vol. 10, no. 12, pp. 1588–1595, 2017.

32. F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, and C. Mi, "A double-sided LCcompensation circuit for loosely coupled capacitive power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 2, pp. 1633–1643, Feb. 2018.
33. H. Zhang, F. Lu, H. Hofmann, W. Liu, and C. Mi, "Six-plate capacitive coupler to reduce electric field emission in large air-gap capacitive power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 1, pp. 665–675, Jan. 2018.
34. Y. G. Su, W. Zhou, A. P. Hu, C. S. Tang, S. Y. Xie, and Y. Sun, "Full duplex communication on the shared channel of a capacitively coupled power transfer system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 4, pp. 3229–3239, Apr. 2017.
35. J. Dai and D. C. Ludois, "A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6017–6029, Nov. 2015.
36. F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, and C. Mi, "An inductive and capacitive combined wireless power transfer system with LC-compensated topology," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 12, pp. 8471–8482, Dec. 2016.
37. D. C. Ludois, J. K. Reed, and K. Hanson, "Capacitive power transfer for rotor field current in synchronous machines," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4638–4645, Dec. 2012.
38. C. Liu, A. P. Hu, B. Wang, and N. C. Nair, "A capacitively coupled contactless matrix charging platform with soft switched transformer control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 249–260, Jan. 2013.
39. M. Pinuela, D. C. Yates, S. Lucyszyn, and P. D. Mitcheson, "Maximizing DC-to-load efficiency for inductive power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 5, pp. 2437–2447, May 2013.
40. S. R. Cove, M. Ordonez, N. Shafiei, and J. Zhu, "Improving wireless power transfer efficiency using hollow windings with track-widthratio," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 9, pp. 6524–6533, Sep. 2016.

ДОДАТКИ

ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ У СИСТЕМАХ З МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНИМ ЗВ'ЯЗКОМ



Виконав:
здобувач II курсу, група ТРм-23-1
КРИЖОВИЙ Максим Володимирович

Науковий керівник:
к.т.н, доцент
МІШАН Віктор Володимирович

Основні положення дипломної роботи

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ:

полягає в необхідності розробки ефективних систем бездротової передачі енергії для забезпечення стабільної та високоефективної роботи пристроїв у сучасних технологічних умовах

МЕТА РОБОТИ:

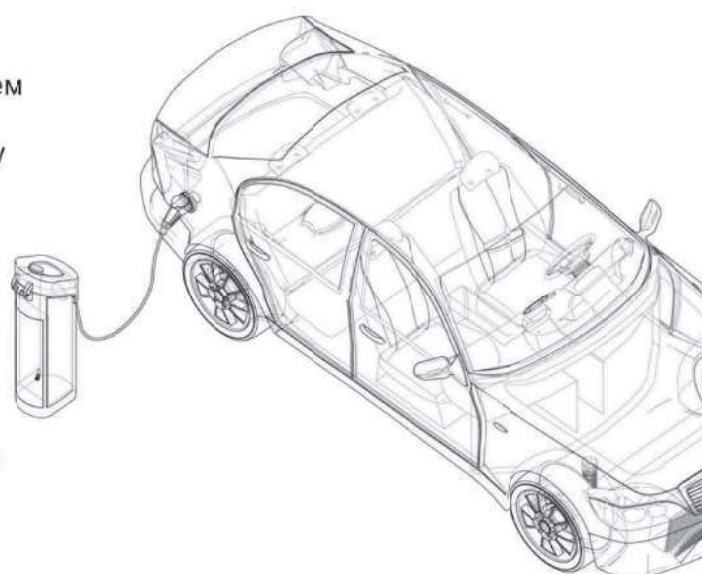
підвищення ефективності магнітно-резонансних систем бездротової передачі енергії шляхом розробки та оптимізації трифазної системи

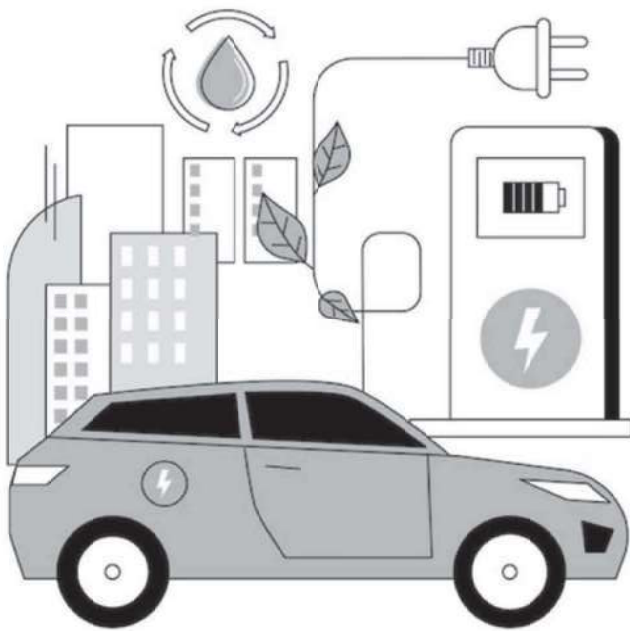
ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

процес бездротової передачі енергії за допомогою магнітного резонансу

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

трифазна система бездротової передачі енергії, зокрема її топологія, конструкція котушок зв'язку та резонансні компенсаційні мережі





НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

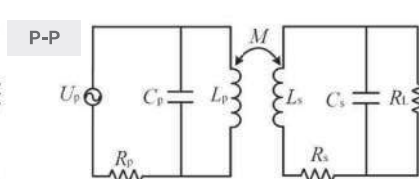
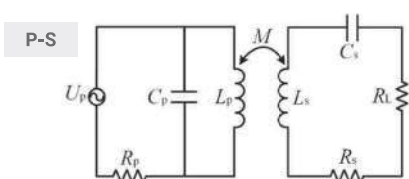
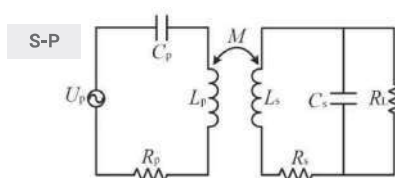
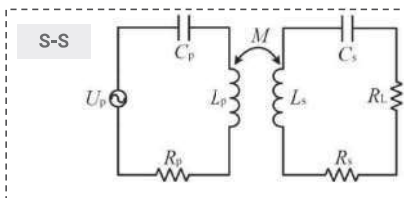
- запропоновано трифазну систему бездротової передачі енергії, яка має низку переваг перед традиційними однофазними системами:
- Зниження втрат магнітного потоку, що мінімізує енергетичні втрати та покращує стабільність системи.
- Зменшення напруги в колі, що підвищує надійність роботи всієї системи.
- Значне підвищення ефективності передачі енергії, що робить технологію більш економічною та екологічно ефективною

3

Топологія та компенсація в системах бездротової передачі енергії

ТИПИ КОМПЕНСАЦІЙНИХ СХЕМ

Обрана схема: **S-S** – забезпечує високу потужність, простоту реалізації



ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ:

- Висока індуктивність витоку та збудження котушки.
- Значні втрати через реактивну потужність.
- Реактивний струм збільшує втрати в перетворювачах.

РІШЕННЯ:

- Впровадження компенсаційної мережі для:
 - Усунення реактивного опору.
 - Підвищення коефіцієнта потужності.
 - Оптимізації навантаження.

4

Топологія трифазної бездротової системи передачі енергії

ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМИ:

- З'єднання котушок у схемі $Y-Y$.
- Реалізовано магнітно-резонансний зв'язок.
- Ємності котушок

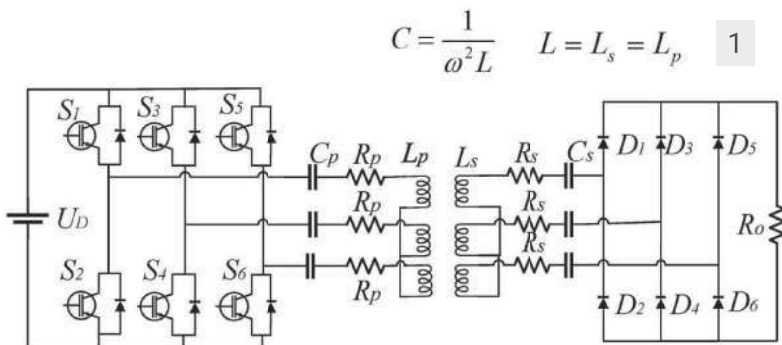


Рис. 2. Топологія трифазної бездротової системи передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком

Ключові елементи системи:

- **Джерело живлення:**
Постійний струм (U_{dc}).
- **Інверторна схема:** Шість MOSFET ($S1 - S6$) для перетворення постійного струму у змінний високої частоти.
- **Трифазна котушка:**
Використовує з'єднання $Y-Y$.
- **Компенсаційні конденсатори:**
 - C_p – послідовно з передавальною котушкою L_p .
 - C_s – послідовно з приймальною котушкою L_s .
- **Котушки:**
 - L_p – передавальна,
 - L_s – приймальна.
 - R_p та R_s – опори відповідних котушок.
- **Повномостовий випрямляч:**
Шість діодів ($D1 - D6$) на стороні навантаження.

5

Еквівалентна модель трифазної системи бездротової передачі енергії

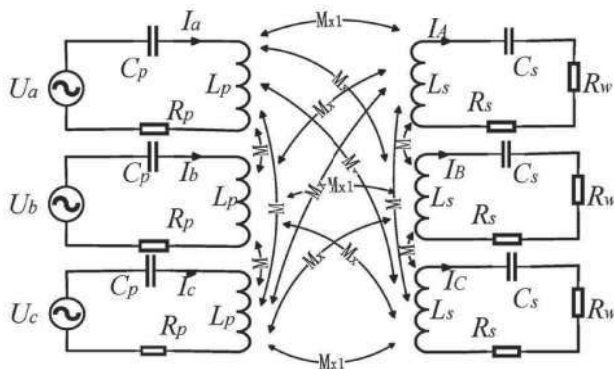


Рис. 3. Топологія трифазної системи бездротової передачі енергії

Ключові компоненти моделі :

- **Самоіндуктивність:**
 L_p – власна індуктивність передавальної котушки.
 L_s – власна індуктивність приймальної котушки.
- **Взаємна індуктивність:**
 M_x – між котушками приймання або передавання.
 M_{x1} – між передавальною та приймальною котушками.
- **Опори котушок:**
 R_p – опір передавальної котушки.
 R_s – опір приймальної котушки.
- **Струми в котушках:**
 I_x – струми у передавальному та приймальному контурах.

6

Еквівалентна модель трифазної системи бездротової передачі енергії

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & j\omega M & j\omega M \\ j\omega M & Z_p & j\omega M \\ j\omega M & j\omega M & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -j\omega M_{x1} & -j\omega M_x & -j\omega M_x \\ -j\omega M_x & -j\omega M_{x1} & -j\omega M_x \\ -j\omega M_x & -j\omega M_x & -j\omega M_{x1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad 2$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega M_{x1} & j\omega M_x & j\omega M_x \\ j\omega M_x & j\omega M_{x1} & j\omega M_x \\ j\omega M_x & j\omega M_x & j\omega M_{x1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_s & -j\omega M & -j\omega M \\ -j\omega M & -Z_s & -j\omega M \\ -j\omega M & -j\omega M & -Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad 3$$

$$Z_p = R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p}, \quad Z_s = (R_s + R_w) + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C}{U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c} \quad 4$$

- ✓ Взаємна індуктивність визначає ефективність передачі енергії.
- ✓ Її значення залежить від розташування та розмірів обмоток.
- ✓ Симетрична структура котушок забезпечує однакові параметри самоіндуктивності.

Застосування моделі:

- Оптимізація конструкції котушок.
- Поліпшення ефективності передачі енергії.
- Визначення параметрів магнітного зв'язку для стабільної роботи системи.

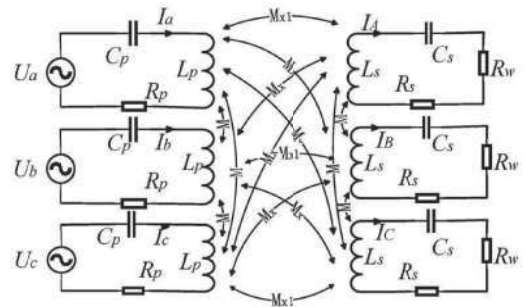


Рис. 3. Топологія трифазної системи бездротової передачі енергії

Аналіз трьохкотушкової структури системи

Магнітне поле в котушці та рівняння Максвелла

Під впливом струму в котушці утворюється магнітне поле

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} & \text{Закон Фарадея} \\ \nabla \times H = J & \text{Закон Ампера} \\ B = \mu H, J = \sigma E \end{cases} \quad 5$$

Рівняння магнітної дифузії та втрати в котушках

виводиться на основі рівнянь Максвелла

$$\nabla^2 \times B + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad 6$$

Враховуючи провідність σ та проникність μ , можна уточнити рівняння дифузії магнітної індукції:

$$-\frac{1}{\mu\sigma} \nabla^2 B + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad 7$$

Втрати в системі

Аналіз проводиться за напрямками: $x: B_x$, $y: B_y$, $z: B_z$. Коли рівняння магнітної дифузії застосовується до котушки зв'язку, виміри в напрямках x, y та z можуть бути обчислені окремо.

Основні втрати зумовлені нагріванням провідника через опір котушки

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu\sigma} \left(\frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial B_x}{\partial t} \\ \frac{1}{\mu\sigma} \left(\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial B_y}{\partial t} \\ \frac{1}{\mu\sigma} \left(\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial B_z}{\partial t} \end{cases} \quad 8$$

Густина магнітного потоку

- Допомогає оптимізувати котушок.
- Підвищити ефективність магнітно-резонансного зв'язку.

$$Q = \frac{1}{T} \int_{T_0-T}^{T_0} J \cdot E dt \quad 9$$

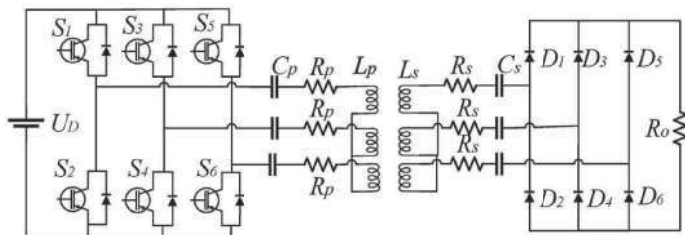


Рис. 2. Топологія трифазної бездротової системи передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком

Таблиця 1. Порівняння структури та характеристик котушки

	Одиночна котушка	Котушка DDQ	Трифазна котушка	Трифазна котушка перекриття
Структура котушки				
Діаметр дроту r	2 мм	2 мм	2 мм	2 мм
Зовнішній діаметр R	150 мм	150 мм	150 мм	150 мм
Кількість витків n	10	10	10	10
Індуктивність L	80 мкГн	80 мкГн	80 мкГн	80 мкГн
Екрануюча конструкція	400 × 400 мм ²	400 × 400 мм ²	400 × 400 мм ²	400 × 400 мм ²
Відстань котушки D	100 мм	100 мм	100 мм	100 мм
Частота f	47,5 кГц	47,5 кГц	47,5 кГц	47,5 кГц
ККД η	93,67%	94,89%	95,12%	96,49%

Моделювання котушки: параметри аналізу

Етапи моделювання:

- **Створення моделі:**
 - Вибір 3D-простору
 - Проектування котушки
- **Матеріали:**
 - Мідна котушка, феритовий екран, повітряний зазор
- **Налаштування системи:**
 - Введення джерела струму, втрат, магнітних параметрів
- **Розрахунки:**
 - Відображення результатів

9

Аналіз ефективності котушок

- **Потужність системи** стала; враховано втрати через тепловий опір
- **Ефективність котушок:**
 - Трифазна котушка в кільцевому розміщенні перевищує ефективність подвійної D-квадратури (DDQ).
 - Перекриваюча трифазна котушка демонструє найвищу ефективність у порівнянні з одношаровою.

• Запропоновано перекриваючий симетричний механізм для трифазної котушки.

• Проведено стаціонарний аналіз із підтвердженням високої ефективності.

МОДЕЛЮВАННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЗСУВУ ($D = 100$ мм):

- **Одношарова котушка:**
 - швидке падіння ефективності.
- **Котушки DDQ та трифазна:**
 - зменшення ефективності більш плавне.
- **Загальний ККД:**
 - Вищий у трифазної котушки.
 - Збільшується при невеликому радіальному відхиленні.

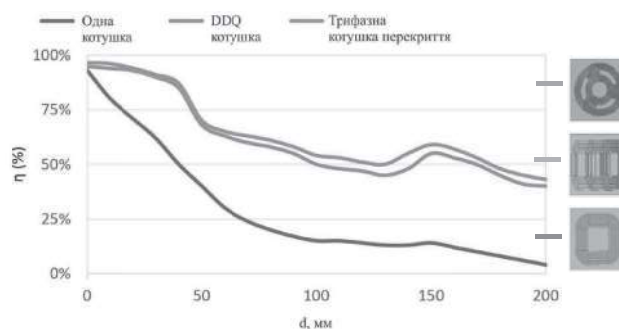


Рис. 4. Моделювання впливу горизонтального зсуву на ефективність котушки в системі бездротової передачі енергії ($D = 100$ мм)

10

Оптимізована трифазна система бездротової передачі енергії

Оптимізація параметрів:

- Досліджено кут перекриття та відстань між котушками
- Симетрична конструкція та оптимізована взаємна індуктивність
- Кут перекриття кожної фази – 180°
- різниця між фазами – 120°

• Трифазна перекриваюча система забезпечує стабільнішу та ефективнішу передачу енергії порівняно з іншими конструкціями

• Оптимізація кута перекриття та розташування покращує характеристики системи

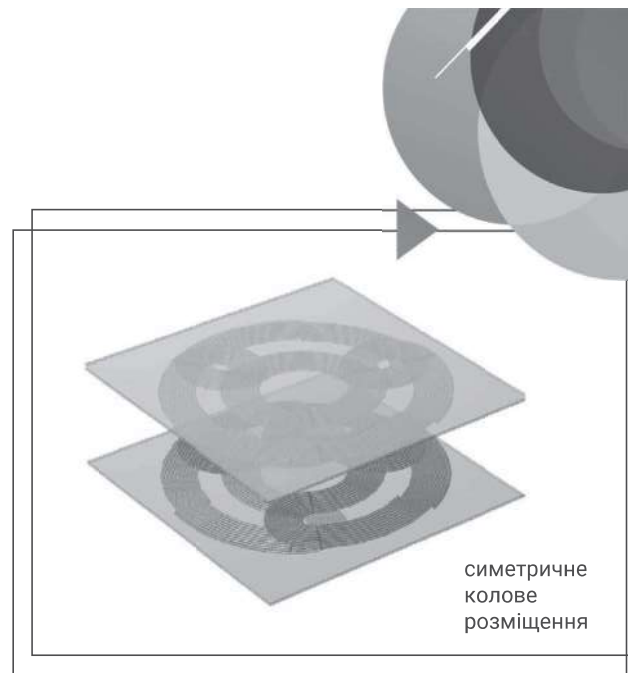


Рис. 5. Модель механізму з'єднання трифазної системи бездротової передачі енергії

Порівняння електричних і магнітних полів між однофазними та трифазними котушками

- Трифазна котушка забезпечує надійніше та ефективніше рішення для бездротової передачі енергії при високих потужностях

Особливості трифазної котушки:

- Розподіляє струм між плечами мосту.
- Струм в кожній фазі менший порівняно з однофазною котушкою.
- Зменшення струму призводить до зниження напруги на котушці.

Таблиця 1. Порівняння структури та характеристик котушки

	Одиночна котушка	Котушка DDQ	Трифазна котушка	Трифазна котушка перекриття
Структура котушки				
Діаметр дроту g	2 мм	2 мм	2 мм	2 мм
Зовнішній діаметр R	150 мм	150 мм	150 мм	150 мм
Кількість витків n	10	10	10	10
Індуктивність L	80 мкГн	80 мкГн	80 мкГн	80 мкГн
Екрануюча конструкція	$400 \times 400 \text{ мм}^2$	$400 \times 400 \text{ мм}^2$	$400 \times 400 \text{ мм}^2$	$400 \times 400 \text{ мм}^2$
Відстань котушки D	100 мм	100 мм	100 мм	100 мм
Частота f	47,5 кГц	47,5 кГц	47,5 кГц	47,5 кГц
ККД η	93,67%	94,89%	95,12%	96,49%



Рис. 6. Режим електричного поля для трифазної та однофазної котушок

Порівняння режимів магнітного поля та щільності магнітного потоку

ПЕРЕВАГИ ТРИФАЗНОЇ КОТУШКИ:

Вища ефективність передачі енергії — до 96,49%, що на 2,82% більше, ніж у однофазної котушки (93,67%).

Компактність конструкції та підвищена ефективність передачі енергії без збільшення розмірів.

Менше потреби в точному вирівнюванні між передавачем і приймачем, що підвищує **гнучкість і стабільність** передачі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ:

- Трифазна секторна котушка забезпечує **вищу щільність магнітного потоку** в порівнянні з однофазною котушкою.
- Магнітне поле трифазної котушки є **сильнішим**, а витік магнітного потоку — **меншим**.
- Трифазна котушка створює **обертове магнітне поле** завдяки зсуву струмів на 120° .

при напрузі 220 В і частоті 47,5 кГц

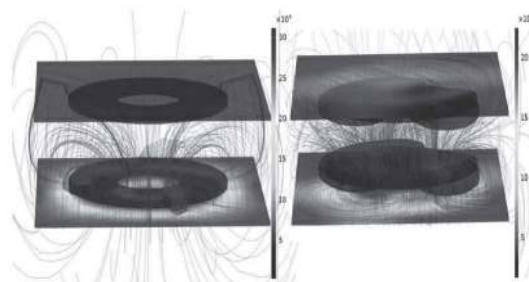
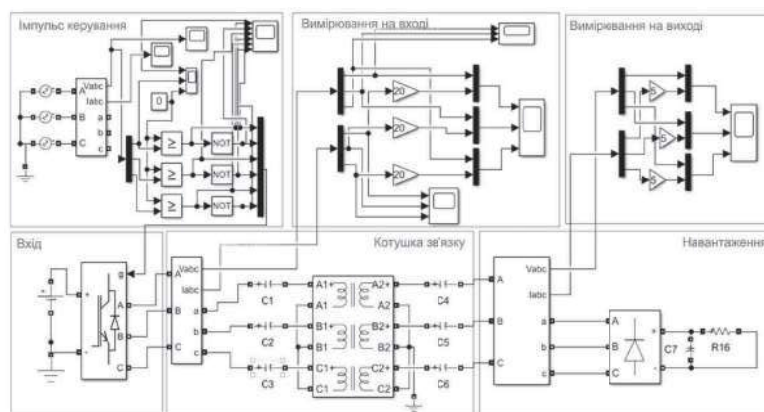


Рис. 7. Порівняння режимів магнітного поля та ліній щільності магнітного потоку в моделі з'єднання системи бездротової передачі енергії

13

Імітаційна модель трифазної системи бездротової передачі енергії в Simulink



14

Сигнал ШІМ трифазного інвертора та час затримки між перемиканнями

Опис сигналу ШІМ:

- ШІМ з коефіцієнтом заповнення 50% та частотою 47,5 кГц.
- Фазовий зсув між трьома фазами складає 120° градусів.
- Імпульсні сигнали верхньої та нижньої гілки кожної фази чергуються для уникнення короткого замикання.

Час затримки встановлено на рівні 600 нс для безпеки та надійності роботи системи

Мінімізація часу затримки для підвищення ефективності та швидкості відгуку системи

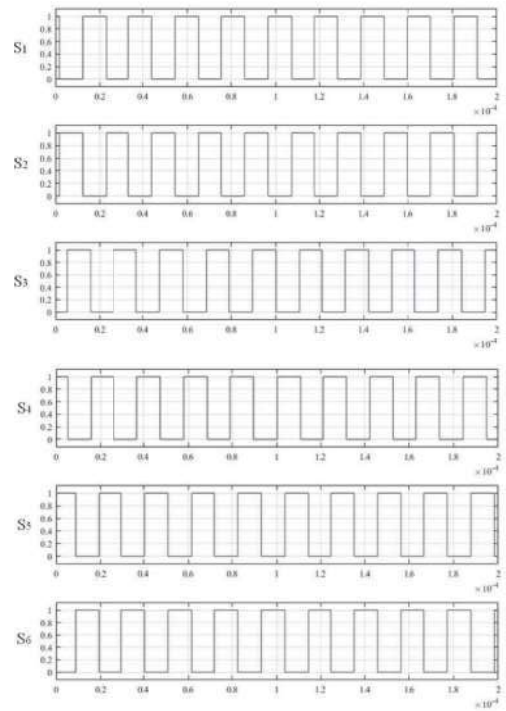


Рис. 9. Форма хвилі ШІМ сигналу керування інвертором

Моделювання та результати аналізу вихідного сигналу

Ключові характеристики:

- Фазовий зсув між напругою та струмом через індуктивність.
- Трифазна система забезпечує стабільність і баланс силових навантажень.
- Покращення якості електроенергії (зменшення коливальних напруги та гармонійних спотворень).

Таблиця 2. Параметри моделювання матричного перетворювача системи бездротової передачі енергії

Параметр	Символ	Значення
Фазова напруга живлення	U_i	220 В
Частота перемикання	f	47,5 кГц
Опір навантажень	R_0	10 Ом
Котушка самоіндукції	L_p, L_s	31 мкГн
Резонансний конденсатор	C_p, C_s	360 нФ
Зразок часу	t	0,1 мкс

Форма сигналу напруги та струму:

- **Напруга:** прямокутна форма з коефіцієнтом заповнення 1/3.
- **Струм:** синусоїдальна форма, свідчить про ефективне перетворення постійної напруги в змінний струм.

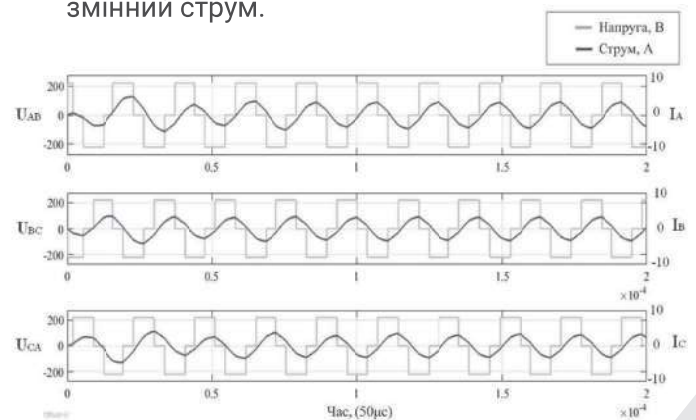


Рис. 10. Форма сигналу напруги та струму на вихідній лінії трифазного передавача

Результати симуляції вихідної напруги та струму на приймальному кінці

Широтно-імпульсна модуляція:

- Форма сигналу вихідної напруги відповідає принципу ШІМ.
- Високий коефіцієнт потужності завдяки фазовому співпадінню напруги і струму.

Підвищення ефективності системи:

- Високий коефіцієнт потужності зменшує енергетичні втрати.
- Підтвердження ефективності топології та стратегії модуляції.

Моделювання вихідної напруги та струму:

- Сигнал має синусоїдальну форму з періодом **21 мкс**.
- Плечі трифазного моста працюють по черзі.
- Частота – **47,5 кГц**.

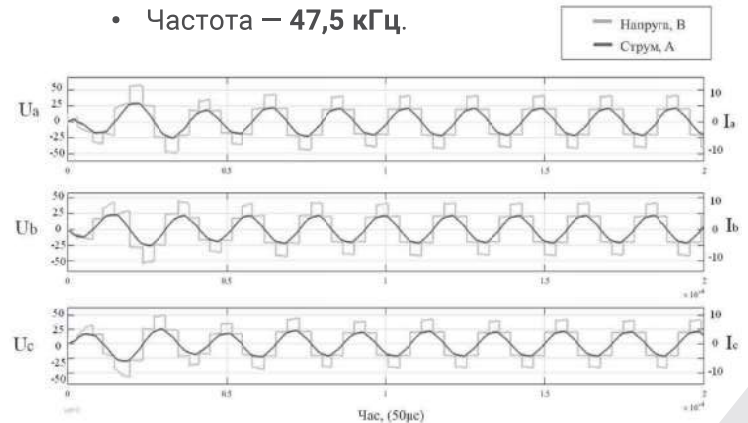


Рис. 11. Форма вихідної фазної напруги та струму на приймальному кінці

17

Висновки

- **Вища ефективність передачі енергії:** трифазний механізм зв'язку забезпечує кращу ефективність порівняно з однофазною котушкою.
- **Мінімізація витoku магнітного потоку:** структура трифазного перекриття дозволяє зменшити втрати магнітного потоку.
- **Підвищення коефіцієнта зв'язку:** покращення зв'язку між котушками.
- **Збільшення верхньої межі змінної потужності:** вищі можливості передачі енергії з трифазною котушкою.
- **Покращення вартості системи:** вища вартість ефективності та зменшення витрат.
- **Збільшення щільності потужності:** покращена щільність потужності в системі.
- **Покращення стабільності роботи:** вища стабільність та надійність роботи системи.
- **Оптимальність для трифазного електропостачання:** підходить для використання в трифазних електричних мережах.



18

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій
д.т.н., доценту ПІДЧЕНКУ Сергію
здобувача вищої освіти
КРИЖОВОГО Максима
ФІТ, гр. ТРМ-23-1

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.

27 листопада 2024 р.
дата


Максим

Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Максим Крижовий

Співавтор:

Назва: Метод підвищення ефективності передачі енергії у системах з магнітно-резонансним зв'язком

Експерт: Віктор Мішан, к.т.н., доц

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1:2.8%

Коефіцієнт подібності 2:0.9%

Мікропробіли: 5

Заміна букв: 14

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2024-12-07 21:40:35.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

Обґрунтування:

Дата 7.12.2024

експерт

Олег ПЛІВОВАР
Доц. каф. ТМІТ(ХНУ)

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 9%

ID: 154948 Назва: Метод підвищення ефективності передачі енергії у системах з магнітно-резонансним зв'язком Додано в БД: 2024-12-05 Автора: Крижовий Максим Володимирович Керівники: Мішан Віктор Володимирович Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	78196	1210	1384 (2%)	24 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РІШЕННЯ

кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ПРО ДОПУСК МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

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

Назва: Метод підвищення ефективності передачі енергії у системах з магнітно-резонансним зв'язком

Автор: Крижовий Максим Володимирович

Спеціальність: 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к.т.н., доцент Мішан Віктор Володимирович

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.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	-
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
5	Інше:	-

Підтвердження: Виявленні запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), складають 2,8% та мають посилання на приведені список літературних джерел.

«07» грудня 2024 р.

Науковий керівник

Завідувач кафедри ТМІТ



Віктор МІШАН

Сергій ПІДЧЕНКО

ВІДГУК

на дипломну роботу

студента групи ТРМ-23-1 Крижового М.В.

«МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ У СИСТЕМАХ З МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНИМ ЗВ'ЯЗКОМ»

Дипломна робота виконана на високому рівні і має значну актуальність у контексті сучасних вимог до бездротової передачі енергії. Актуальність роботи полягає в необхідності розвитку та вдосконалення систем з магнітно-резонансним зв'язком для підвищення їх ефективності, зокрема через впровадження трифазних систем. Робота демонструє глибоке розуміння теоретичних аспектів і практичних завдань, пов'язаних з цією тематикою.

Позитивні сторони роботи включають чітке визначення мети, використання сучасних методів моделювання, що дозволяють підвищити ефективність передачі енергії, а також комплексний підхід до аналізу всіх складових системи. Результати моделювання підтвердили значне зниження втрат магнітного потоку та напруги в контурі, що є важливим для практичного застосування.

Негативні сторони роботи можуть включати недостатню увагу до альтернативних методів підвищення ефективності передачі енергії та можливі технічні труднощі, пов'язані з реалізацією трифазних систем у реальних умовах. Ці аспекти можуть потребувати подальшого дослідження та розробки.

В цілому, дипломна робота є ґрунтовною і демонструє високу кваліфікацію автора. Вона надає корисні результати, які можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем бездротової передачі енергії з магнітним резонансом.

Під час виконання дипломної роботи Крижовий М.В. провів детальний аналіз вітчизняної та закордонної технічної літератури та патентних матеріалів, що дозволило йому прийняти обґрунтовані рішення у процесі роботи. Він проявив креативність, ініціативність, старанність і наполегливість, демонструючи здатність і навички застосовувати набуті знання для вирішення складних задач, а також виявив обізнаність у сучасних системних та інформаційних технологіях.

Дипломна робота відзначається високим технічним рівнем і має беззаперечну актуальність у галузі сучасних телекомунікацій. Здобувач Крижовий М.В. заслуговує на оцінку "добре".

Керівник:
к.т.н., доцент



Віктор МІШАН

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Крижовий Максим Володимирович

Тема роботи: Метод підвищення ефективності передачі енергії у системах з магнітно-резонансним зв'язком

Спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Обсяг дипломної роботи

Кількість листів креслень ____ Кількість сторінок записки 80

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Мета дипломної роботи полягає в в підвищенні ефективності магнітно-резонансних систем бездротової передачі енергії. Для цього було розроблено та оптимізовано трифазну систему передачі енергії, яка включає в себе нову топологію, конструкцію котушок зв'язку та резонансні компенсаційні мережі. Основні завдання включали моделювання процесів передачі енергії, аналіз топологій і оптимізацію характеристик системи для досягнення високої ефективності. В результаті виконаного дослідження була представлена багатофізична модель, яка дозволила підвищити ефективність передачі енергії, зменшити втрати магнітного потоку і напруги в контурі, що істотно покращило загальні характеристики системи. Експериментальні дослідження підтвердили підвищення ефективності та надійності роботи розробленої трифазної системи.

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: У роботі проведено огляд теоретичних основ магнітного резонансу, принципи та розвиток цієї технології для бездротової передачі енергії, включаючи історію і сучасні застосування. Аналізуються можливості, переваги та недоліки трифазних систем, їх ефективність, стабільність і застосування в різних високопотужних сферах. Виконане проектування і моделювання трифазних магнітно-резонансних систем з використанням сучасних методів та інструментів для оптимізації характеристик передачі енергії. Виконано моделювання для оцінки ефективності та стабільності різних конфігурацій магнітно-резонансних систем, зокрема трифазних, з урахуванням змінних умов навколишнього середовища.

4. Позитивні сторони роботи: Позитивні аспекти роботи включають чітке визначення мети дослідження, використання сучасних методів моделювання та оптимізації для підвищення ефективності магнітно-резонансних систем бездротової передачі енергії, а також комплексний підхід до аналізу різних аспектів системи — від топології до конструкції котушок зв'язку і резонансних мереж.

5. Негативні сторони роботи: включають обмежений розгляд альтернативних підходів до підвищення ефективності передачі енергії та можливі недооцінки або зневажання технічних труднощів, пов'язаних з впровадженням трифазних систем у практичні застосування

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

7. Відгук про роботу в цілому: В цілому дипломна робота є ґрунтовною і добре структурованою, демонструє глибоке розуміння досліджуваної проблематики. Вона надає корисні результати, які можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем бездротової передачі енергії з магнітним резонансом.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка дипломної роботи: Дипломна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (4,25/5), а її автору Крижовому М.В., присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності «Електронні комунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Мартинюк Валерій Володимирович — д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

« 02 » грудня 2024 р.



підпис