

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Метод підвищення вихідної потужності електронних комунікаційних систем для
безпроводної передачі енергії

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи РАМ-61
спеціальності 172 Електронні комунікації та

радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Слабковський М.Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Хвостівська Л. В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Хвостівська Л. В.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Дунець В. Л

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В. Л.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю

172 Електронні комунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

студенту

Слабковському Максиму Богдановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод підвищення вихідної потужності електронних комунікаційних систем для безпроводної передачі енергії

Керівник роботи

Хвостівська Лілія Володимирівна, к.т.н., доц.

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

Затверджені наказом ректора від « 29 » листопада 2024 року № 4/7-1145.

2. Термін подання студентом завершеної роботи

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження: Процес передачі енергії безпроводним шляхом

Предмет дослідження: Система безпроводної передачі енергії

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітична частина

2. Основна частина

3. Науково - дослідна частина

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Представлення

2. Актуальність теми

3. Розвиток і аналіз технології безпроводної передачі енергії

4. Принцип роботи і аналіз запропонованої технології

5. Наукова новизна

6. Загальні висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Зелінський І.М., доц. каф. ПВ		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Окіпний І.Б., зав. каф. МТ		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Слабковський М.Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Хвостівська Л.В.

(прізвище та ініціали)

F •g•kl _j kl \ h hkl •l b •gZnɔb Mɔj Zɔb
 L _j ghi •evkvdbc gZp•hgZevgbc l _og•qgbc nɔ• _j kbl _l •f _g•1\ ZgZl nɔx y
 NZdnevl _l i j bdeZ^gbo •gn hj f Zp•cgbo l _ogheh] •c l Z _e dl j h•g` _g j •€
 i h\ gZgZa ZnZdnevl _l m
 DZn _^j Zj Z^•hl _og•qgbo kbkl _f
 i h\ gZgZa Zdz n _^j b

D<: E1N1D: P1CG: JH; HL:

gZa^h[m\ y hkl •l gv h] h kl m _gy

f Z•kl j
 gZa Zhkl •l gv h] h kl m _gy
 gZl _f m _F _l h^ i •\ bs _ggy \ bo^ gh€i hl m ghkl • _e dl j hggbo dhf nɔ•dzp•cgbo kbkl _f ^ey
 [_a j h\ ^gh€i j _^Zq• _g j] •€

<bdhgZ eZ kl m^_gl dZ _____ dnj km]j m b _J: f
 ki _p•Zevghkl • _____ ?e dl j hgg•dhf nɔ•dzp•€l Z
 j Z^•hl _og•dZ

r bnj •gZa Zki _p•Zevghkl •

_____ KeZ dh\ kvdbc F ;
 i •i bk i j •a bs _l Z•g•p•Zeb

D_j •\ gbd _____ O\ hkl •\ kvdZE <
 i •i bk i j •a bs _l Z•g•p•Zeb

Ghj f hdhgl j hev _____ O\ hkl •\ kvdZE <
 i •i bk i j •a bs _l Z•g•p•Zeb

AZ •^n Zq dZn _^j b _____ >nɔ _pv < E
 i •i bk i j •a bs _l Z•g•p•Zeb

J_p_ga_gl _____
 i •i bk i j •a bs _l Z•g•p•Zeb

L _j ghi •ev

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1. Аналіз існуючих аналогів систем передачі енергії.....	9
1.2. Дослідження сучасних інверторів для енергетичних передач	12
1.3. Оцінка ефективності існуючих резонансних систем для передачі енергії	13
1.4. Висновки до розділу 1.....	21
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА	22
2.1. Дослідження системи передачі енергії на основі п'яти рівневого інвертора	22
2.2. Дослідження роботи двохрезонансної мережі	26
2.3. Висновки до розділу 2	28
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	30
3.1.Дослідження і перевірка системи передачі енергії безпроводним шляхом на потенціал підвищення потужності.....	30
3.2.Аналіз ефективності системи	35
3.3. Вибір робочих точок інвертора.....	37
3.4 Перевірка результатів.....	39
3.5. Висновки до розділу 3.....	41
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ..	42
4.1. Психологічні причини нещасних випадків і травматизму	42
4.2. Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання.....	45
4.3 Висновок до розділу 4.....	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50
ДОДАТОК А	56
Копія тези	56

ВСТУП

Актуальність теми. Технологія бездротової передачі енергії набуває все більшого значення в умовах розвитку сучасного світу, де зростають вимоги до зручності, ефективності та безпеки енергопостачання. Ця технологія знаходить застосування в багатьох сферах — від мобільних пристроїв до побутової електроніки, промислового обладнання та навіть біомедичних імплантатів. Її актуальність зумовлена потребою зменшити залежність від проводів, підвищити гнучкість енергетичної інфраструктури та створити компактні й надійні системи для повсякденного використання.

Сьогоднішні бездротові рішення дозволяють не лише спростити енергопостачання, а й покращити екологічність систем за рахунок мінімізації матеріальних ресурсів, необхідних для виготовлення традиційних кабельних з'єднань. Бездротові технології забезпечують електричну ізоляцію, знижують ризик коротких замикань, перегріву або інших несправностей, пов'язаних із фізичним зносом компонентів. Окрім цього, відсутність фізичного контакту між джерелом і споживачем енергії відкриває нові можливості для роботи в складних умовах, наприклад, у вологому чи забрудненому середовищі.

У запропонованому дослідженні акцент зроблено на покращенні ефективності передачі енергії за допомогою інноваційного підходу, що базується на багаторівневих інверторах та резонансних мережах. Це дозволяє зменшити втрати енергії, оптимізувати процес заряджання або живлення пристроїв і забезпечити стабільну роботу системи навіть за змінних умов. Такий підхід відкриває нові горизонти для широкомасштабного впровадження бездротових технологій у різні галузі.

Розвиток бездротових систем передачі енергії є важливим етапом у побудові інтелектуальних енергетичних мереж, які відповідають сучасним викликам — від високої щільності споживання енергії до зростаючих вимог до її якості та надійності. Подальше дослідження цієї теми сприятиме впровадженню сталих та екологічних рішень у повсякденне життя.

Метою роботи є розгляд і дослідження вже існуючих систем безпроводної передачі електроенергії, і проведення науково дослідної роботи у її удосконаленні шляхом пошуку нових методів передачі або модифікації існуючих.

Задачі:

1. Здійснити аналіз відомих систем передачі енергії безпроводним шляхом.
2. Аналіз застосування резонансних систем при передачі енергії.
3. Розробити математичний метод та алгоритм передачі енергії з допомогою модифікованої системи передачі енергії та оцінити її роботу.

Об'єкт дослідження. Процес передачі енергії безпроводним шляхом.

Предмет дослідження. Система безпроводної передачі енергії.

Методи дослідження. Базуються на головних положеннях радіотехніки, математики, використання електромагнітних полів, базових принципів резонансних систем.

Наукова новизна. Полягає в підвищенні ККД систем безпроводної передачі енергії шляхом оптимізації передачі, зменшення втрат та підвищенням стабільності системи в тому числі і у складних умовах..

Теоретичне та практичне значення здобутих результатів. Суть полягає в розробці нової моделі бездротової передачі енергії, що базується на багаторівневому інверторі та двохрезонансній мережі. Це розширює наукове розуміння енергопередачі в резонансних мережах, а також пропонує підходи для підвищення її ефективності та стабільності.

Публікації.

Описані в збірнику XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів, теза зі збірника наведена в додатку А.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз існуючих аналогів систем передачі енергії

Бездротова передача енергії (WPT) — це новий метод передачі енергії, який дозволяє здійснювати безконтактну передачу енергії [1,2,3,4], що значно підвищує гнучкість і безпеку споживання енергії. Магнітно-кореляційна WPT була широко досліджена завдяки своїм перевагам, таким як висока потужність та ефективність, проста конструкція тощо. Останнім часом, у відповідь на зростаючий попит на ринку, попит на вихідну потужність WPT систем поступово збільшується [5,6]. Загалом, оптимізація з наступних трьох аспектів може підвищити вихідну потужність WPT систем.

Згідно з теоремою максимального передавання потужності, потужність, що передається від джерела до навантаження, максимізується, коли імпеданс навантаження збігається з внутрішнім імпедансом джерела живлення [7,8,9,10]. У літературі [11] для забезпечення більш широкого діапазону варіацій навантаження запропоновано метод розширення діапазону імпедансної відповідності на основі понижувального перетворювача для відстеження точки максимального передавання потужності в WPT системах, що сприяє покращенню продуктивності системи з більшою адаптивністю до варіацій навантаження та коефіцієнтів зв'язку. У літературі [12] запропоновано метод проєктування системи для імпедансної відповідності мережі WPT системи, що живиться від одноктного інвертора з перемикачами, що оптимізує параметри двопортової мережі для підтримання сталої вихідної потужності при варіаціях коефіцієнта зв'язку. У літературі [13] запропоновано метод адаптивної імпедансної відповідності в реальному часі, який спочатку використовує амплітуду вхідної напруги WPT системи разом з середнім значенням активної та реактивної потужності для отримання амплітуди і фази вхідного імпедансу системи, а потім обчислює параметри імпедансної відповідності мережі. Цей метод застосовується до широкого діапазону відстаней між котушками (від сильно зв'язаних до слабо

зв'язаних областей). Коли досягається як оптимальна потужність навантаження, так і ефективність передачі при тій самій робочій частоті, цей стан називається синхронізацією ефективності потужності; в іншому випадку це називається асинхронією ефективності потужності. Для імпедансної відповідності збільшення вихідної потужності в умовах асинхронії ефективності потужності неминуче призведе до зниження ефективності передачі.

Збільшення взаємної індуктивності системи. Взаємну індуктивність можна збільшити шляхом підвищення власної індуктивності передавальних або приймальних котушок; однак висока індуктивність не лише потребує більше простору [14,15], а й збільшує внутрішній опір та знижує ефективність системи. Взаємну індуктивність також можна збільшити, змінюючи відстань між котушками зв'язку або регулюючи їхнє просторове зміщення [14,16,17]. Однак розміри котушок зв'язку та відстань не можна змінювати значно в багатьох інженерних практиках [16,18], тому збільшити вихідну потужність системи шляхом підвищення значення взаємної індуктивності системи досить складно. Крім того, коли змінюються розміри та відстань котушок зв'язку, стабільність передачі погіршується, а ефективність передачі знижується. Тому в літературі [19] запропоновано систему WPT з анти-симетрією паритетного часу (анти-РТ) на основі антирезонансного режиму, яка має вищу безпеку, надійність, гнучкість і ефективність передачі порівняно з традиційними резонансними WPT системами.

Збільшення амплітуди струму в передавальній котушці. Амплітуду струму в передавальній котушці можна збільшити, посиливши потужність інвертора або використовуючи кілька каналів передачі потужності для збільшення вихідної потужності WPT систем. Збільшення потужності інвертора може бути досягнуто за допомогою трьохфазних або багатофазних інверторів [20,21,22], паралельного з'єднання інверторів та каскадних мультирівневих інверторів [23,24]. Трифазні або багатофазні інвертори мають просту конструкцію, низьку вартість та швидку динамічну реакцію, що дозволяє швидко контролювати амплітуду та фазу вихідної напруги. Однак за певних умов роботи вони можуть генерувати великі гармонічні струми. Хоча каскадні мультирівневі інвертори допомагають зменшити гармонічний

вміст вихідної напруги та не мають проблем з дисбалансом напруги конденсаторів, вони вимагають більше незалежних джерел живлення, що збільшує вартість та розміри системи, тому наразі необхідні подальші дослідження для покращення вихідної потужності системи через створення кількох каналів передачі. Три основні підходи — кілька передавачів-один приймач [25], кілька передавачів-кілька приймачів та один передавач-кілька приймачів [26]. У літературі [27] запропоновано триканальну систему WPT з мінімальним перехресним зв'язком, так що амплітуду та фазовий кут струму в кожному каналі можна регулювати без втручання з боку інших каналів, що значно покращує вихідну потужність. Для вирішення проблеми перехресного зв'язку між кількома каналами література [28] аналізує вплив перехресного зв'язку на основі числових виразів вхідного імпедансу, включаючи перехресний зв'язок з одного боку та боковий перехресний зв'язок. На цій основі запропоновано більш гнучкий і узагальнений метод усунення перехресного зв'язку на основі компенсації еквівалентного імпедансу без додавання контрольно-регулювальних контурів або елементів схеми. Однак для багатоканальних структур кожен канал вимагає окремого інвертора та резонансної мережі, що призводить до збільшення простору та вартості.

Загалом, для існуючих методів дослідження методи імпедансної відповідності можуть призводити до зниження ефективності передачі при підвищенні вихідної потужності. Хоча взаємну індуктивність механізму зв'язку можна збільшити структурно, розміри та відносне розташування котушок зазвичай важко змінити значно в практичних застосуваннях. Крім того, трифазні або багатofазні інвертори можуть викликати великі гармонічні струми, паралельне з'єднання кількох інверторів може впливати на стабільність системи через проблеми з циркуляційними струмами, а каскадні мультирівневі інвертори вимагають більше незалежних джерел живлення. Для багатоканальних WPT систем зазвичай необхідні більш складні механізми зв'язку та конструкції управління.

Націлюючись на проблеми існуючих методів підвищення потужності в WPT системах, ця робота пропонує новий метод підвищення потужності на основі мультирівневого інвертора та двоєдиної резонансної мережі. Спочатку для генерації

основних та гармонічних виходів застосовується діодозатиснутий п'ятиступінчастий інвертор. Потім на передавальній стороні застосовується двоєдина резонансна мережа, а на приймальній стороні створюються два канали прийому. Завдяки параметричній конфігурації система може перебувати в резонансному стані як на основній частоті, так і на третій гармоніці, що дозволяє здійснювати передачу потужності на обох частотах і таким чином покращувати вихідну потужність системи.

1.2. Дослідження сучасних інверторів для енергетичних передач

Багаторівневі інвертори (MLI) стали однією з найбільш перспективних технологій у силовій електроніці, забезпечуючи суттєві переваги в енергоефективності та якості вихідних характеристик. Ці інвертори знаходять широке застосування в таких галузях, як інтеграція відновлюваних джерел енергії, приводи електродвигунів, електромобілі, а також у високовольтних системах передачі електроенергії. Нижче буде описано кілька основних типів мультирівневих інверторів.

Каскадні Н-мостові інвертори (CHB). Каскадні інвертори складаються з кількох послідовно з'єднаних осередків Н-мосту. Цей підхід дозволяє генерувати вихідну напругу, яка складається з кількох рівнів, забезпечуючи високу якість напруги змінного струму. Каскадні Н-мости є модульними за своєю конструкцією, що робить їх ідеальними для масштабованих систем, таких як сонячні електростанції, де необхідна велика потужність і висока надійність. Їх використання також сприяє зменшенню напруги на кожному перемикачі, що дозволяє використовувати компоненти з нижчими номінальними характеристиками, підвищуючи економічну ефективність системи.

Діодно-затискаючі мультирівневі інвертори (DC-MLI). Цей тип інверторів використовує діоди для обмеження напруги на ключах, що дозволяє генерувати вихідну напругу з багатьма рівнями. Їх часто застосовують у промислових приводах і високовольтних системах передачі енергії. Основними перевагами цього підходу є висока ефективність і можливість роботи з дуже високими рівнями напруги. Проте

збільшення кількості компонентів, таких як діоди і конденсатори, може ускладнювати конструкцію і підвищувати вимоги до управління.

Мультирівневі інвертори з плаваючими конденсаторами (FC-MLI). Ці інвертори використовують конденсатори як джерело різномісних напруг. Вони забезпечують гнучкість в управлінні напругою і високу якість вихідного сигналу. Однак їх використання вимагає складних алгоритмів управління для балансування напруги на конденсаторах, що ускладнює реалізацію системи.

Гібридні топології. Гібридні мультирівневі інвертори поєднують переваги різних конструкцій, забезпечуючи оптимальне співвідношення між складністю системи, ефективністю і надійністю. Такі конструкції дозволяють зменшити кількість перемикачів та інших компонентів, зберігаючи високий рівень продуктивності.

Мультирівневі інвертори мають кілька ключових переваг, які забезпечують їх популярність у сучасних енергетичних і промислових системах.

Зменшення гармонійних спотворень. Багаторівневий характер вихідної напруги зменшує кількість небажаних гармонік, що знижує необхідність використання великих фільтрів.

Енергоефективність. Зменшення втрат енергії під час перемикання забезпечує кращу продуктивність системи.

Модульність і масштабованість. Можливість додавання або видалення модулів дозволяє адаптувати систему до конкретних потреб.

Надійність і відмовостійкість. Гібридні конструкції забезпечують роботу системи навіть у разі виходу з ладу окремих компонентів.

1.3. Оцінка ефективності існуючих резонансних систем для передачі енергії

Резонансні системи відіграють ключову роль у бездротовій передачі енергії (WPT), оскільки саме вони забезпечують ефективне узгодження між джерелом енергії та навантаженням. У таких системах резонансні мережі оптимізують передачу енергії, зменшують втрати та підвищують стабільність роботи навіть за змінних умов навантаження чи відстані між передавачем і приймачем.

Одним із головних викликів у розробці WPT-систем є досягнення високої ефективності передачі енергії, уникнення перегрівання компонентів і забезпечення стабільної роботи в широкому діапазоні частот. Для цього застосовуються різні типи резонансних мереж, кожна з яких має свої переваги та обмеження залежно від умов експлуатації.

Резонансні мережі в системах WPT розробляються для оптимізації передачі енергії, мінімізації втрат та забезпечення стабільної роботи незалежно від умов експлуатації. Нижче описано основні типи резонансних систем, які застосовуються у таких технологіях.

Серійний резонанс — це один із найпростіших типів резонансних систем, що широко використовується у різних електротехнічних застосуваннях, зокрема в системах бездротової передачі енергії (WPT). Його принцип роботи базується на включенні індуктивності (L) та ємності (C) в послідовний контур з навантаженням, що дозволяє досягти резонансної частоти.

У серійному контурі резонанс досягається тоді, коли індуктивний опір ($X_L = \omega L$) дорівнює ємнісному опору ($X_C = 1/\omega C$), що призводить до їхньої взаємної компенсації. На резонансній частоті ($f_r = 1/\sqrt{2\pi LC}$).

Імпеданс контуру зводиться до мінімального значення (визначається лише активним опором). Струм у контурі досягає максимуму при заданій напрузі.

Переваги даного типу резонансних систем наступні:

- При резонансній частоті вся енергія, що надходить від джерела, передається навантаженню з мінімальними втратами.
- Це робить серійний резонанс підходящим для систем, де важливе максимально ефективне використання енергії.
- Мінімальна кількість компонентів (індуктивність, ємність та активне навантаження).
- Простота розрахунків і налаштувань.
- Серійні контури здатні генерувати значні струми, що корисно для передачі потужності.

Утім, у даних систем є і недоліки:

- Якщо параметри навантаження змінюються (наприклад, відстань між котушками в WPT), це може призводити до розбалансування резонансу та втрат енергії.
- Складнощі в багаточастотних режимах. Серійний резонанс забезпечує оптимальну передачу лише на одній частоті (f_r), що робить його менш придатним для динамічних систем.
- При високих напругах на вході можуть виникати надмірні струми, які потребують додаткового захисту від перегрівання.

У сучасних WPT-системах серійний резонанс застосовується у випадках, де простота та ефективність важливіші за адаптивність до змінних умов. Однак для більш універсальних систем із змінними параметрами (відстань, навантаження) розглядають більш складні типи резонансних мереж, такі як паралельний чи LLC-резонанс.

Паралельний резонанс є ще одним популярним типом резонансної системи, що використовується в електронних пристроях, зокрема у бездротових передачах енергії. У цій системі індуктивність (L) і ємність (C) з'єднані паралельно, і саме їхнє узгодження дозволяє забезпечити резонанс на певній частоті. Важливою рисою паралельного резонансу є його здатність підтримувати стабільність напруги на навантаженні, що робить систему зручнішою для певних типів застосувань.

У паралельному резонансному контурі імпеданс змінюється в залежності від частоти. При резонансній частоті, коли індуктивний опір X_L дорівнює ємнісному опору X_C , система демонструє мінімальний імпеданс, і струм в контурі досягає максимального значення. На резонансній частоті паралельний контур характеризується високим коефіцієнтом якості (Q), що дозволяє підтримувати стабільність напруги та мінімізувати втрати енергії.

Використання паралельного резонансу може дати наступні переваги:

- Паралельний резонанс забезпечує постійну напругу на навантаженні, що важливо для забезпечення стабільної роботи споживачів енергії. Така система добре підходить для застосувань, де потрібно зберігати точність напруги незалежно від коливань навантаження.

- Паралельний резонанс може працювати з широким діапазоном навантажень, оскільки зміни в навантаженні не так сильно впливають на стабільність роботи системи, як у серійному резонансі.

- Завдяки високому коефіцієнту якості, паралельні резонансні контури можуть забезпечити низький рівень гармонійних спотворень, що особливо важливо в радіочастотних і комунікаційних технологіях.

Утім дана система має і певні недоліки:

- У порівнянні з серійним резонансом, паралельний контур має більш низький коефіцієнт передачі енергії, оскільки енергія зберігається в ємності й індуктивності, а не безпосередньо в навантаженні.

- Паралельний резонанс має свою специфіку в налаштуваннях для різних частот, що може вимагати точних розрахунків та налаштувань для досягнення оптимальної роботи в широкому діапазоні частот.

У системах бездротової передачі енергії паралельний резонанс зазвичай використовується в тих випадках, де важливо забезпечити стабільність напруги, наприклад, для живлення чутливих електронних компонентів, де потрібна стабільність вихідної напруги незалежно від змін у відстані або навантаженні. Однак його ефективність у порівнянні з серійним резонансом або складнішими системами, такими як LLC, є обмеженою для більш складних та динамічних застосувань.

Паралельний резонанс може бути використаний у системах, де напруга повинна залишатися стабільною на виході, наприклад у малих бездротових зарядних пристроях, передавачах для датчиків або системах, що вимагають стабільного живлення при змінному навантаженні.

Серійно-паралельний резонанс комбінує елементи серійного і паралельного резонансів для досягнення оптимальної ефективності в бездротових передавальних системах енергії. Така система дозволяє отримати переваги обох типів резонансних контурів, зберігаючи високу ефективність передачі енергії і стабільність роботи при змінних умовах.

У серійно-паралельному резонансному контурі індуктивність і ємність поєднуються таким чином, що одна частина системи працює як серійний резонанс, а

інша — як паралельний. Це дозволяє комбінувати переваги обох підходів, як можливість передавати енергію за оптимальних умов при низькому імпедансі, так і стабілізувати напругу на навантаженні, покращуючи стабільність при змінних навантаженнях і відстанях.

Таким чином, резонанс на одній частоті підтримується завдяки поєднанню серійного і паралельного контурів, що дозволяє знижувати енергетичні втрати й підвищувати ефективність.

Така система дозволяє ефективно адаптуватися до змін у відстані між передавачем і приймачем, а також до коливань навантаження. Завдяки цьому система може підтримувати високу ефективність передачі енергії навіть при непередбачуваних змінах умов.

Комбінація серійного і паралельного контурів дозволяє досягти високої ефективності на всіх етапах передачі енергії, що робить цю технологію привабливою для систем з великим діапазоном частот і змінними навантаженнями.

Така система дозволяє коригувати характеристики резонансу в широкому діапазоні частот, що важливо для багатофункціональних пристроїв і систем.

Утім, не дивлячись на переваги застосування даної системи може мати певні труднощі в реалізації. Оскільки система комбінує два типи резонансних контурів, її конструкція і налаштування можуть бути значно складнішими порівняно з окремими серійними або паралельними контурами. Це потребує більш точних розрахунків і налаштувань.

Комбінація двох контурів може призводити до деяких втрат у компонентах, особливо при наявності неідеальних елементів, таких як індуктивності з низьким коефіцієнтом якості або ємності з високими втратами.

Серійно-паралельний резонанс найбільш ефективний у тих системах WPT, де важливо забезпечити стабільність роботи при змінних умовах навантаження та відстані. Зокрема, така система використовується в високотехнологічних бездротових зарядних пристроях і великих бездротових енергетичних системах, де потрібно підтримувати високу ефективність передачі енергії навіть при різних параметрах навантаження і змінній відстані між передавачем і приймачем.

Системи серійно-паралельного резонансу часто застосовуються у великих бездротових енергетичних мережах для зарядки електричних транспортних засобів або в промислових бездротових системах, де важливо підтримувати стабільну передачу потужності в умовах різних навантажень і відстаней між компонентами.

LLC резонансні системи є одним з найбільш ефективних типів резонансних схем, що використовуються у бездротових передачах енергії (WPT). Ця система є особливо популярною в технічних рішеннях, де необхідно досягти високої ефективності передачі енергії при мінімальних енергетичних втрат. LLC резонанс поєднує в собі переваги серійного та паралельного резонансів, що дозволяє отримати оптимальне співвідношення між енергією, що передається, і рівнем втрат у системі.

LLC резонансна система отримала свою назву завдяки трьом основним елементам: індуктивності (L), індуктивності (L) і конденсатору (C), які разом утворюють резонансний контур. Основним принципом роботи LLC системи є використання двох резонансних контурів для забезпечення ефективного зниження імпедансу та передачі енергії через резонанс.

У такій схемі один з контурів (середній контур, L) працює в серійному з'єднанні, а інший — у паралельному. Це дозволяє системі ефективно контролювати рівень імпедансу та змінювати його залежно від умов навантаження, що дозволяє мінімізувати втрати енергії й досягти високої ефективності передачі енергії.

LLC резонансні системи дозволяють досягти високої ефективності, завдяки здатності знижувати втрати на резонансних частотах. Це робить їх ідеальними для застосування в таких областях, як WPT, де важливий мінімальний рівень втрат енергії при передачі через великі відстані.

LLC системи працюють в широкому діапазоні частот і можуть ефективно налаштовуватися для роботи з різними типами навантажень. Це дозволяє використовувати їх у складних технічних рішеннях з динамічними змінами навантаження і відстані.

Завдяки резонансному налаштуванню, LLC системи мають менші втрати енергії порівняно з іншими типами систем передачі енергії, що робить їх більш ефективними при тривалому використанні та великих навантаженнях.

LLC резонансна система дозволяє гнучко налаштовувати частоту роботи в залежності від конкретних умов і вимог, що підвищує її універсальність у використанні.

Не дивлячись на це система також має певні недоліки. Технічні характеристики LLC резонансної системи вимагають точних розрахунків та налаштувань для досягнення оптимальної роботи, що може бути складно для нових розробок або в умовах змінного навантаження.

Налаштування резонансної частоти залежить від параметрів індуктивності та ємності, що може обмежувати можливість адаптації до змінюваних робочих умов.

LLC резонансна система широко використовується в бездротових технологіях передачі енергії завдяки своїй здатності забезпечити високу ефективність при збереженні низьких енергетичних втрат. Вона застосовується в різних сферах, таких як бездротове заряджання електричних пристроїв, у тому числі і транспортних засобів, а також у промислових системах для передачі енергії на великі відстані з мінімальними втратами.

Особливість LLC систем полягає в її здатності підтримувати стабільність роботи при змінах навантаження та відстані, що робить їх ідеальними для використання в складних бездротових енергетичних мережах.

Двоєдина резонансна мережа (LLC) є одним з найбільш ефективних рішень для бездротової передачі енергії (WPT), оскільки поєднує низку переваг, що дозволяють підвищити ефективність передачі енергії при мінімальних енергетичних витратах. Її вибір для дослідження обґрунтовано кількома ключовими факторами, серед яких високий коефіцієнт корисної дії, стабільність роботи при змінних навантаженнях, а також зручність інтеграції в більш складні системи.

- Висока ефективність при мінімальних енергетичних втратах. Однією з основних переваг LLC резонансних мереж є висока ефективність передачі енергії. Оскільки ця система використовує резонанс для мінімізації енергетичних втрат, вона забезпечує оптимальну передачу енергії навіть на великі відстані. Це особливо важливо для бездротових енергетичних систем, де втрати енергії можуть значно знижувати ефективність роботи системи. Резонансні системи LLC знижують вплив

втрат на трансформатори та інші компоненти системи, що дозволяє досягти більш стабільної і високоефективної роботи. Зокрема, це дає змогу працювати при високих навантаженнях і зберігати хорошу ефективність навіть за змінних умов.

- Гнучкість і налаштовуваність системи LLC резонансні системи мають високу гнучкість, що дозволяє використовувати їх в різноманітних умовах. Оскільки система може ефективно працювати в широкому діапазоні частот, її можна адаптувати під різні умови передачі енергії. У WPT системах це дозволяє підтримувати стабільність навіть при змінних відстанях між передавачем і приймачем, що є важливим фактором для збереження ефективності. Така гнучкість також забезпечує налаштування параметрів резонансу для досягнення кращої адаптації до умов навантаження, що знижує ризик перегріву і втрат енергії.

- Низькі рівні електромагнітних випромінювань. Ще однією важливою перевагою LLC резонансної мережі є можливість зниження рівня електромагнітних випромінювань порівняно з іншими типами резонансних мереж. Оскільки система оптимізує резонанс на частотах з мінімальними втратами, вона дозволяє уникнути зайвих випромінювань, що є важливим для збереження екологічної чистоти середовища і забезпечення безпеки використання таких систем у побутових і промислових умовах.

- Стабільність при змінних навантаженнях. LLC резонансні системи демонструють високу стабільність у роботі при змінних навантаженнях, що особливо важливо для бездротових зарядних станцій і інших систем, де можуть спостерігатися часті зміни навантаження.

- Ідеальна інтеграція з іншими компонентами системи.
LLC резонансна мережа добре інтегрується з іншими компонентами системи WPT, зокрема з інверторами і передавальними антенами, забезпечуючи ефективний процес заряджання без потреби у додаткових елементах для компенсації енергетичних втрат. Така інтеграція дозволяє спростити конструкцію і зменшити витрати на додаткові компоненти, що робить систему більш економічною.

- Можливість застосування для різноманітних частотних діапазонів. LLC резонансні системи здатні працювати у широкому частотному діапазоні, що дозволяє

адаптувати їх до різних типів пристроїв і технологій, які використовуються в бездротових передачах енергії. Це робить систему універсальною для застосування в різних сферах, від побутових пристроїв до високотехнологічних промислових систем.

1.4. Висновки до розділу 1

Існуючі методи підвищення ефективності бездротової передачі енергії, такі як магнітно-кореляційні підходи, імпедансна відповідність та оптимізація взаємної індуктивності, демонструють високу ефективність за умов стабільних параметрів системи. Однак ці підходи часто обмежені складністю реалізації та неможливістю адаптації до змінних умов навантаження і відстаней між передавачем та приймачем.

Методи на основі мультирівневих інверторів дозволяють знизити втрати енергії та гармонійні спотворення, забезпечуючи високу стабільність передачі. Проте їх реалізація вимагає складних алгоритмів управління, а збільшення кількості компонентів ускладнює конструкцію і підвищує витрати на систему.

Резонансні мережі, особливо LLC та двоєдині, демонструють високу ефективність при змінних умовах експлуатації. Водночас більшість із них не здатні повною мірою вирішити проблему втрат енергії на високих частотах або в умовах багатоканальної передачі.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Дослідження системи передачі енергії на основі п'яти рівневого інвертора

У цьому підрозділі розглядається система бездротової передачі енергії (WPT), що базується на мультирівневому інверторі та двоєдиній резонансній мережі. Мультирівневий інвертор дозволяє покращити якість вихідної напруги та зменшити гармонійні спотворення, що критично важливо для ефективності енергопередачі. Двоєдина резонансна мережа, у свою чергу, забезпечує стабільну і ефективну передачу енергії через оптимізацію взаємодії між передавальними та приймальними котушками, знижуючи втрати енергії та підвищуючи ефективність системи при різних навантаженнях.

Запропонована система в основному поділяється на три частини, як показано на рис. 2.1.

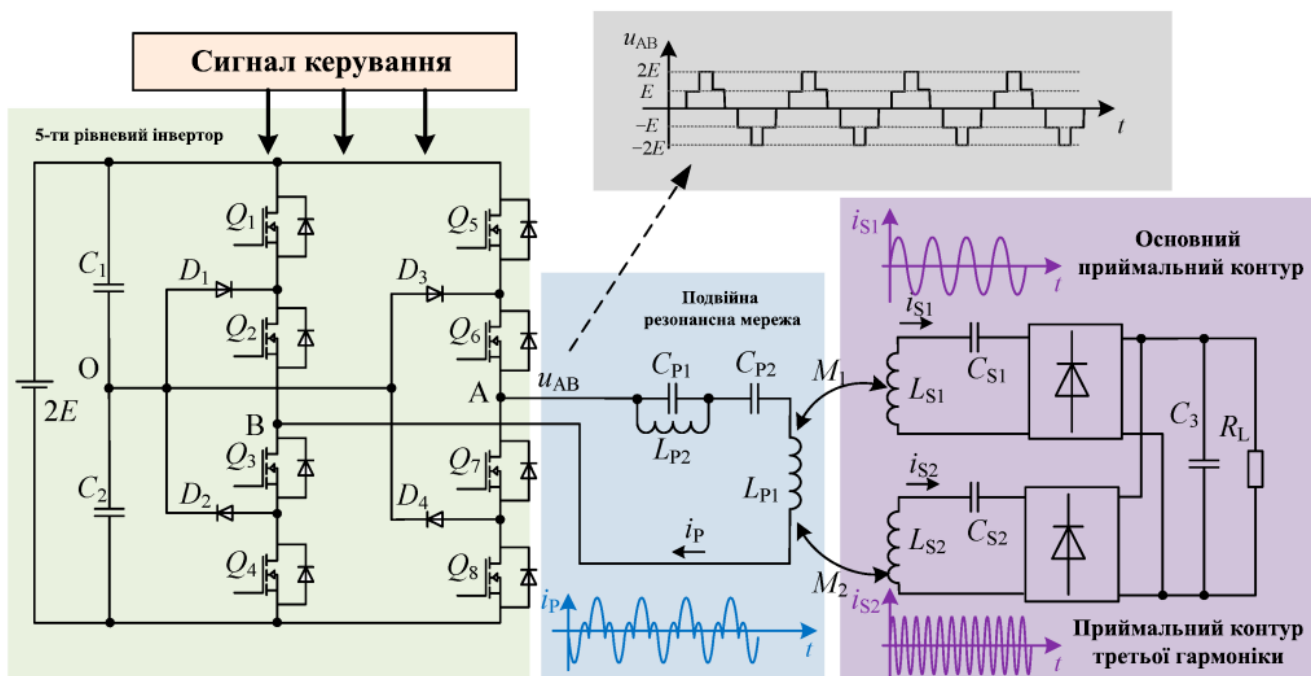


Рис. 2.1. Схематична структура запропонованої WPT системи.

Перша частина — це зв'язок високочастотного інвертора. Для перетворення постійного струму в високочастотний змінний використовується п'ятиступінчастий інвертор з діодами-затискачами, де Q_1 – Q_8 — це силові MOSFET перемикачі, а D_1 – D_4 — це діоди-затискачі. Порівняно з дво- та трьохступінчастими інверторами, вихідна напруга п'ятиступінчастого інвертора містить більш багатий і широкий спектр керованих гармонік.

Друга частина — це двоєдина резонансна мережа, що складається з конденсатора C_{P1} та індуктора L_{P2} , з'єднаних паралельно, а потім серійно з конденсатором C_{P2} та передавальною котушкою L_{P1} .

Двоєдина резонансна мережа має дві резонансні точки, які можуть бути налаштовані на основну та третю гармоніки через параметричну конфігурацію, що дозволяє здійснювати одночасну передачу потужності на обох частотах.

Третя частина — це електромагнітне зв'язування та приймальна схема на приймальній стороні. Є два канали прийому: основний канал прийому (канал 1) і канал прийому третьої гармоніки (канал 2). Приймальна котушка в основному каналі — це L_{S1} , а конденсатор, що резонує з нею, — C_{S1} .

Приймальна котушка в каналі третьої гармоніки — це L_{S2} , а конденсатор, що резонує з нею, — C_{S2} . Взаємна індуктивність каналу 1 — $M1$, а взаємна індуктивність каналу 2 — $M2$.

Обидва канали прийому з'єднані паралельно після випрямлення і, нарешті, фільтруються за допомогою конденсатора $C3$ для постачання потужності до навантажувального резистора R_L .

Топологія діодозатиснутого п'ятиступінчастого інвертора показана на рис. 2.2а, що включає міст 1 і міст 2. Міст 1 генерує триступінчасту напругу u_{BO} через чергування перемикачів $Q1$ – $Q4$, а міст 2 генерує триступінчасту напругу u_{AO} через чергування перемикачів $Q5$ – $Q6$. Віднімання двох триступінчатих напруг дає п'ятиступінчасту вихідну напругу u_{AB} . Її основні робочі форми хвиль показані на рис. 2б, де T — це робочий цикл.

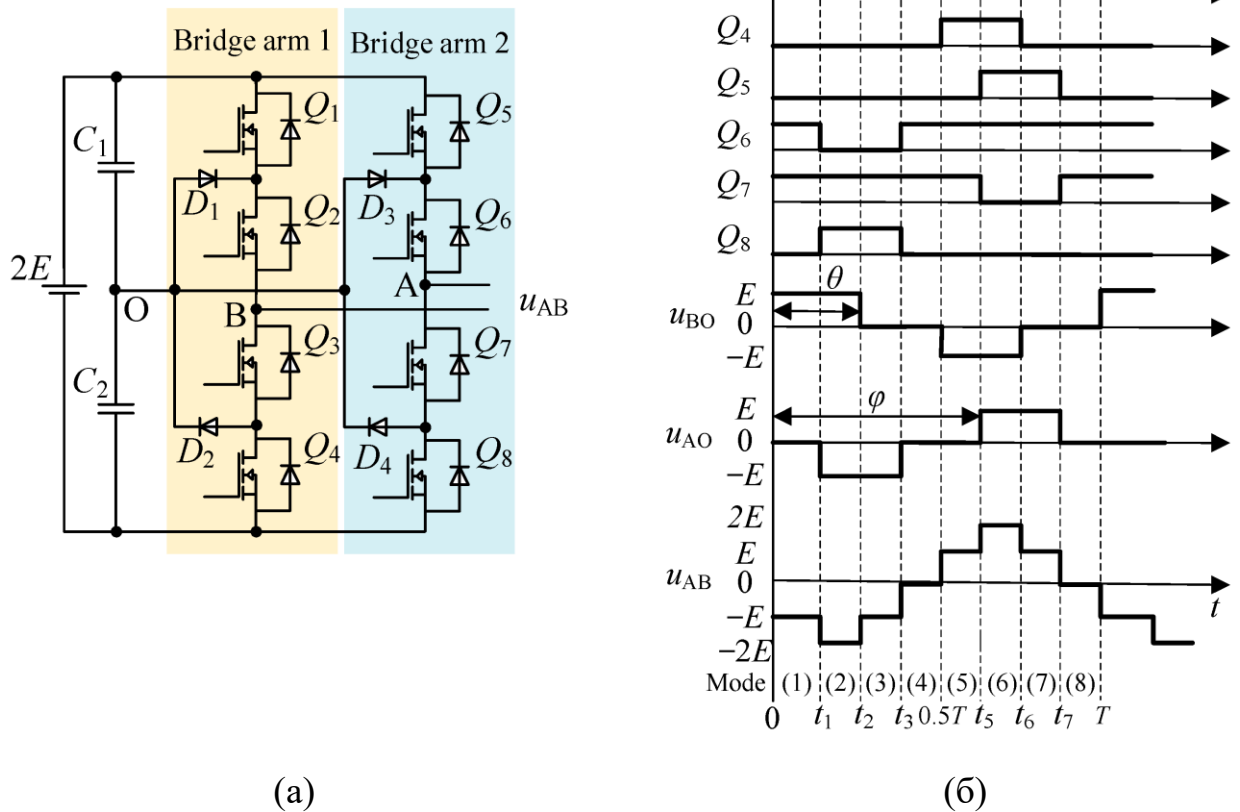


Рис. 2.2. Діодно-затискний п'ятирівневий інвертор. (а) топологія; (б) основні робочі форми сигналів

Відповідні робочі режими п'ятиступінчастого інвертора аналізуються наступним чином:

Режим 1: протягом часового інтервалу $0-t_1$, Q_1 і Q_2 в першому мості увімкнені, Q_3 і Q_4 вимкнені, і точка В з'єднана з позитивним кінцем C_1 , отже, $u_{BO} = U_{C1} = E$. Q_5 і Q_8 в другому мості вимкнені, Q_6 і Q_7 увімкнені, і точка А з'єднана з точкою О, отже, $u_{AO} = 0$. Тому, $u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} = -E$.

Режим 2: часовий інтервал t_1-t_2 , Q_1 і Q_2 в першому мості увімкнені, Q_3 і Q_4 вимкнені, і точка В з'єднана з позитивним кінцем C_1 , отже, $u_{BO} = U_{C1} = E$. Q_5 і Q_6 в другому мості вимкнені, Q_7 і Q_8 увімкнені, і точка А з'єднана з негативним кінцем C_2 , отже, $u_{AO} = -E$. Тому, $u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} = -2E$.

Режим 3: протягом часового інтервалу t_2-t_3 , Q_2 і Q_3 в першому мості увімкнені, Q_1 і Q_4 вимкнені, і точка В з'єднана з точкою О, отже, $u_{BO} = 0$. Q_5 і Q_6 в другому мості вимкнені, Q_7 і Q_8 увімкнені, і точка А з'єднана з негативним кінцем C_2 , отже, $u_{AO} = -E$. Тому, $u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} = -E$.

Режим 4: протягом часового інтервалу $t_3-0.5T$, Q_2 і Q_3 в першому мості увімкнені, Q_1 і Q_4 вимкнені, і точка В з'єднана з точкою О, отже, $u_{BO} = 0$. Q_5 і Q_8 в другому мості вимкнені, Q_6 і Q_7 увімкнені, і точка А з'єднана з точкою О, отже, $u_{AO} = 0$. Тому, $u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} = 0$.

Режим 5: протягом часового інтервалу $0.5T-t_5$, Q_3 і Q_4 в першому мості увімкнені, Q_1 і Q_2 вимкнені, і точка В з'єднана з негативним кінцем C_2 , отже, $u_{BO} = -E$. Q_5 і Q_8 в другому мості вимкнені, Q_6 і Q_7 увімкнені, і точка А з'єднана з точкою О, отже, $u_{AO} = 0$. Тому, $u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} = E$.

Режим 6: протягом часового інтервалу t_5-t_6 , Q_3 і Q_4 в першому мості увімкнені, Q_1 і Q_2 вимкнені, і точка В з'єднана з негативним кінцем C_2 , отже, $u_{BO} = E$. Q_7 і Q_8 в другому мості вимкнені, Q_5 і Q_6 увімкнені, і точка А з'єднана з позитивним кінцем C_1 , отже, $u_{AO} = E$. Тому, $u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} = 2E$.

Режим 7: протягом часового інтервалу t_6-t_7 , Q_2 і Q_3 в першому мості увімкнені, Q_1 і Q_4 вимкнені, і точка В з'єднана з точкою О, отже, $u_{BO} = 0$. Q_7 і Q_8 в другому мості вимкнені, Q_5 і Q_6 увімкнені, і точка А з'єднана з позитивним кінцем C_1 , отже, $u_{AO} = E$. Тому, $u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} = E$.

Режим 8: протягом часового інтервалу t_7-T , Q_2 і Q_3 в першому мості увімкнені, Q_1 і Q_4 вимкнені, і точка В з'єднана з точкою О, отже, $u_{BO} = 0$. Q_5 і Q_8 в другому мості вимкнені, Q_6 і Q_7 увімкнені, і точка А з'єднана з точкою О, отже, $u_{AO} = 0$. Тому, $u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} = 0$.

Згідно з наведеним аналізом, вираз для розрахунку u_{AB} наступна:

$$u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} \quad (2.1)$$

Для моста 1 і моста 2 хвильові форми їх вихідних напруг u_{BO} та u_{AO} можна виразити через розклад Фур'є:

$$\begin{cases} u_{BO}(t) = \sum_{n=2k-1}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \sin \frac{n\theta}{2} \cos(n\omega t - \frac{n\theta}{2}) \\ u_{AO}(t) = \sum_{n=2k-1}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \sin \frac{n\theta}{2} \cos(n\omega t - \frac{n\theta}{2} - n\varphi) \end{cases} \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (2.2)$$

де n — порядок гармоніки, t — час роботи системи, а ω — кутова частота роботи інвертора. Тоді, з рівнянь (2.1) та (2.2), п'ятиступінчасту вихідну напругу можна обчислити наступним чином:

$$u_{AB}(t) = \sum_{n=2k-1}^{\infty} \frac{8E}{n\pi} \sin \frac{n\theta}{2} \sin(\frac{n\varphi}{2}) \sin(-n\omega t + \frac{n\theta}{2} + \frac{n\varphi}{2}) \quad (2.3)$$

З виразу (2.3) видно, що коли вхідна постійна напруга інвертора визначена, його вихідна напруга залежить від коефіцієнта заповнення (θ) вихідної напруги двох мостів і фазової різниці (φ) між двома мостами.

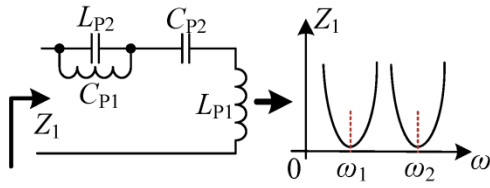
2.2. Дослідження роботи двохрезонансної мережі

У цій роботі на передавальній стороні використовується компенсація за допомогою двохрезонансної мережі, як показано на рис. 3а. Її еквівалентний імпеданс Z_1 можна виразити як:

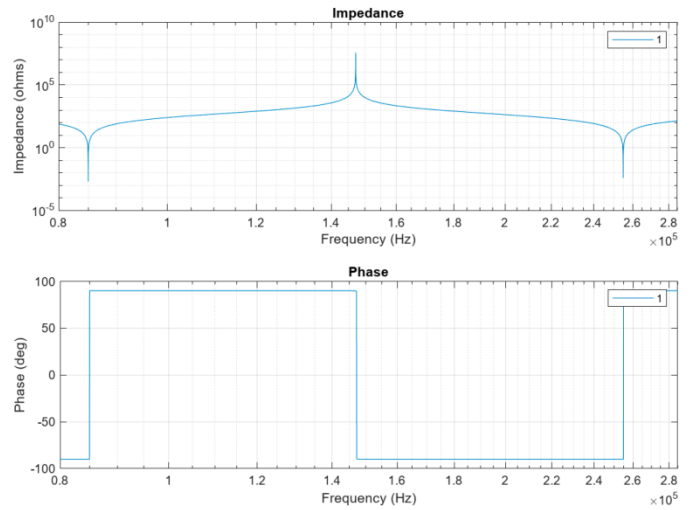
$$Z_1 = \left(j\omega L_{P2} // \frac{1}{j\omega C_{P1}} \right) + \frac{1}{j\omega C_{P2}} + j\omega L_{P1} = j \left(\frac{\omega^4 L_{P1} L_{P2} C_{P1} C_{P2} - \omega^2 (L_{P1} C_{P2} + L_{P2} C_{P1} + L_{P2} C_{P2}) + 1}{\omega^3 L_{P2} C_{P1} C_{P2} - \omega C_{P2}} \right) \quad (2.4)$$

Згідно з виразом (2.4), імпедансні характеристики Z_1 можна побудувати, як показано на рис. 2.3б.

Можна побачити, що Z_1 має дві точки з мінімальними значеннями імпедансу і нульовою фазою, що відповідають двом резонансним частотам.



(а)



(б)

Рис. 2.3 Двохрезонансна мережа. (а) топологія; (б) Імпедансні характеристики.

Коли система перебуває в резонансному стані, Z_1 має дорівнювати нулю, що можна виразити як:

$$\omega^4 L_{P1} L_{P2} C_{P1} C_{P2} - \omega^2 (L_{P1} C_{P2} + L_{P2} C_{P1} + L_{P2} C_{P2}) + 1 = 0 \quad (2.5)$$

Припускаючи, що два резонансні пункти двохрезонансної мережі — це ω_1 та ω_2 , згідно з теоремою Вієта, зв'язок між ними можна обчислити як:

$$(2.6)$$

Припускаючи, що ω_0 — це резонансна частота L_{P2} та C_{P1} , а також резонансна частота L_{P1} та C_{P2} , тобто:

$$\omega_1 \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_{P2} C_{P1} L_{P1} C_{P2}}} \quad (2.7)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{P1} C_{P2}}} \frac{1}{\sqrt{L_{P2} C_{P1}}} \quad (2.8)$$

Підставивши вирази (2.6)–(2.8) в вираз (2.5), можна отримати зв'язок між C_{P1} та C_{P2} як:

$$\frac{C_{P2}}{C_{P1}} = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega_0^2} - 2 \quad (2.9)$$

Дві резонансні частоти ω_1 та ω_2 двохрезонансної мережі встановлюються відповідно на основну та третю гармоніку вихідної напруги інвертора, щоб досягти передачі енергії на цих двох частотах. Тому подальший зв'язок між ω_0 , ω_1 та ω_2 буде наступним:

$$\begin{cases} \omega_2 = 3\omega_1 \\ \omega_0 = \sqrt{3}\omega_1 \end{cases} \quad (2.10)$$

Підставивши вираз (2.10) в (2.9), можна отримати зв'язок між C_{P1} та C_{P2} :

$$C_{P1} = \frac{3}{4} C_{P2} \quad (2.11)$$

2.3. Висновки до розділу 2

Під час дослідження систем бездротової передачі енергії було запропоновано метод оптимізації енергетичних характеристик системи на основі використання п'ятиступінчастого мультирівневого інвертора та двоєдиної резонансної мережі. Цей підхід дозволив ефективно використовувати гармонійні компоненти вихідної напруги для покращення передачі енергії.

Визначено, що ключовими параметрами системи є гармонійна синхронізація інвертора та налаштування резонансних частот мережі, які дозволяють мінімізувати втрати енергії та підвищити загальну продуктивність системи. Використання двохрезонансної мережі забезпечує передачу енергії на кількох частотах, що сприяє адаптації системи до змінних умов експлуатації.

Для реалізації цього підходу застосовано метод гармонійного аналізу, який дозволяє дослідити ефективність передачі енергії при різних параметрах модуляції та резонансу. Результати моделювання підтвердили можливість суттєвого підвищення вихідної потужності системи шляхом налаштування основної частоти і третьої гармоніки.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Дослідження і перевірка системи передачі енергії безпроводним шляхом на потенціал підвищення потужності

Сучасні системи бездротової передачі енергії вимагають постійного вдосконалення для забезпечення високої потужності та стабільної роботи. Зростання енергетичних потреб у різних галузях стимулює розробку рішень, спрямованих на оптимізацію передачі енергії з мінімальними втратами. У цьому контексті підвищення потужності є одним із ключових напрямів досліджень, що сприяє покращенню загальної продуктивності та адаптації системи до різноманітних умов експлуатації.

Особливо важливим є впровадження інноваційних підходів, які дозволяють підвищити потужність без істотного збільшення складності або розмірів обладнання, що відкриває нові перспективи для широкого застосування.

Згідно з виразом (2.3), значення RMS вихідної напруги інвертора можна виразити як:

$$U_{AB} = \sum_{n=2k-1}^{\infty} \frac{4\sqrt{2}E}{n\pi} \sin \frac{n\theta}{2} \sin \frac{n\varphi}{2} \quad (3.1)$$

Підставивши $k = 1$ та $k = 3$ в вираз (3.1), значення RMS основної та третьої гармоніки вихідної напруги інвертора можна записати як:

$$\begin{cases} U_{AB1} = \frac{4\sqrt{2}E}{\pi} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \\ U_{AB3} = \frac{4\sqrt{2}E}{3\pi} \sin \frac{3\theta}{2} \sin \frac{3\varphi}{2} \end{cases} \quad (3.2)$$

Для спрощення структури схеми, навантажувальний резистор R_L еквівалентний еквівалентним резисторам R_1 та R_2 у двох приймальних ланцюгах до випрямлення, як показано на рис. 3.1, де I_{S1} та I_{S2} — це значення RMS струму в двох приймальних

катушках, U_{S1} та U_{S2} — це значення RMS індукованої напруги в двох приймальних катушках, I_{O1} та I_{O2} — це струми в двох приймальних каналах після випрямлення, а I_O — це струм навантаження. Два приймальних канали запропонованої системи з'єднані паралельно для постачання енергії навантаженню. Припускаючи, що вихідна потужність двох каналів становить P_1 і P_2 відповідно, їхні вирази можна отримати з рис. 3.1 як:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{I_{O1}}{(I_{O1}+I_{O2})} I_O^2 R_L \\ P_2 = \frac{I_{O2}}{(I_{O1}+I_{O2})} I_O^2 R_L \end{cases} \quad (3.3)$$

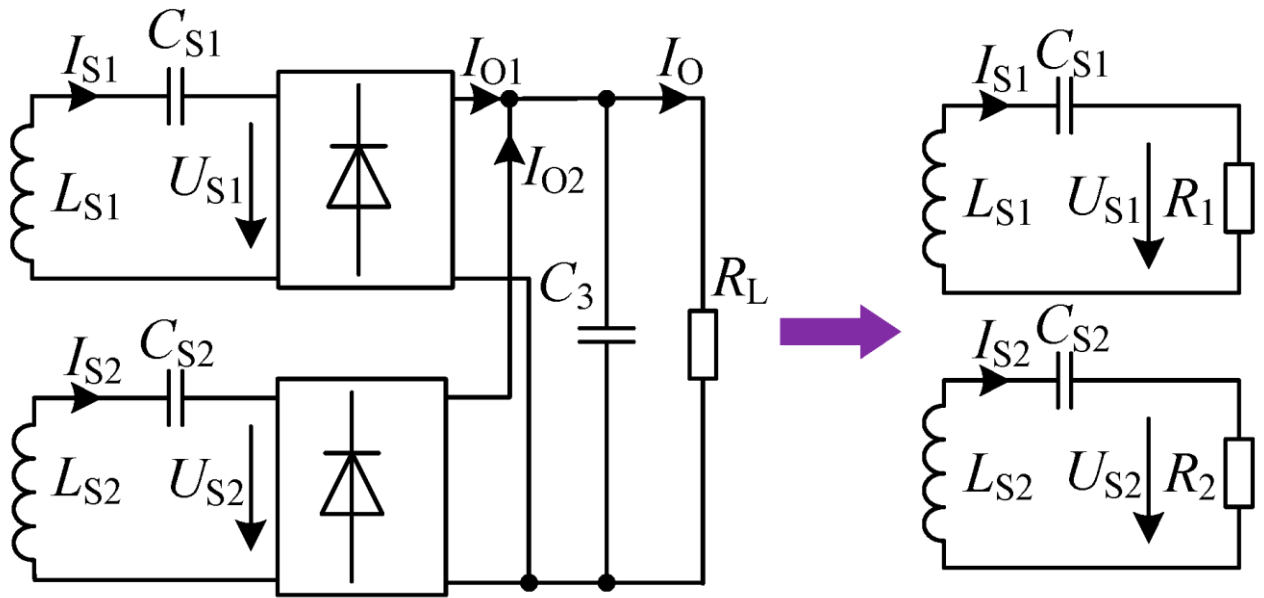


Рис. 3.1. Еквівалентна схема приймальної сторони.

Підставивши $I_O = I_{O1} + I_{O2}$ в вираз (3.3), P_1 та P_2 можна виразити як:

$$\begin{cases} P_1 = (I_{O1} + I_{O2}) I_{O1} R_L \\ P_2 = (I_{O1} + I_{O2}) I_{O2} R_L \end{cases} \quad (3.4)$$

Припускаючи, що випрямляч є ідеальним компонентом і потужність до та після випрямлення є однаковою, відповідні виразом можна записати так:

$$\begin{cases} U_{S1}I_{S1} = P_1 = (I_{O1} + I_{O2})I_{O1}R_L \\ U_{S2}I_{S2} = P_2 = (I_{O1} + I_{O2})I_{O2}R_L \\ I_{O1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}I_{S1}, I_{O2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}I_{S2} \\ \vdots \\ U_{S1} = I_{S1}R_1, U_{S2} = I_{S2}R_2 \end{cases} \quad (3.5)$$

Спростуючи вираз (3.5), можна отримати зв'язок між навантажувальним резистором R_L та еквівалентними резисторами R_1 і R_2 таким чином:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{8(I_{S1}+I_{S2})R_L}{\pi^2 I_{S1}} \\ R_2 = \frac{8(I_{S1}+I_{S2})R_L}{\pi^2 I_{S2}} \\ \vdots \end{cases} \quad (3.6)$$

Через значну різницю частот між основною та третьою гармоніками, можна вважати два канали незалежними.

Тому вихідну потужність кожного каналу можна обчислити окремо, а потім загальну вихідну потужність можна отримати, додавши ці дві.

Еквівалентні схеми основного та третього гармонійних каналів показано на рис. 3.2, де I_{P1} та I_{P2} — це значення ефективних (RMS) струмів в передавальних котушках для двох каналів відповідно.

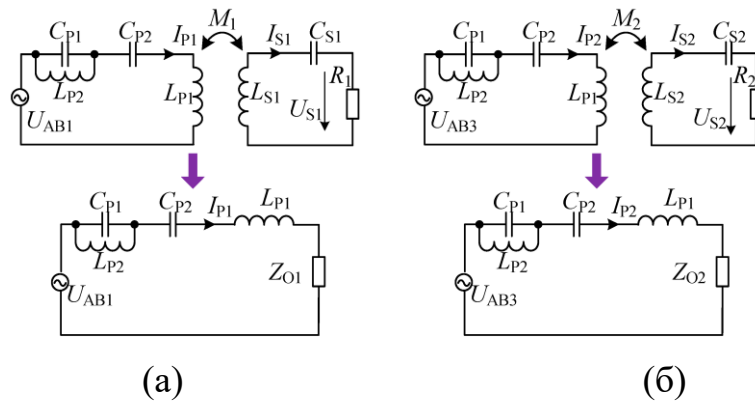


Рис. 3.2. Еквівалентні схеми основного та третього гармонійних каналів. (а) Основний; (б) Третя гармоніка.

Відбитий імпеданс, відображений з приймальної сторони на передавальну в еквівалентній схемі основного каналу, позначається як Z_{O1} і може бути виражений як:

$$Z_{O1} = \frac{\omega_1^2 M_1^2}{R_1} \quad (3.7)$$

На основі цього можна отримати вирази для I_{P1} , U_{S1} та I_{S1} , як:

$$\begin{cases} I_{P1} = \frac{U_{AB1}}{Z_{O1}} = \frac{U_{AB1} R_1}{\omega_1^2 M_1^2} \\ U_{S1} = \omega_1 M_1 I_{P1} = \frac{U_{AB1} R_1}{\omega_1 M_1} \\ I_{S1} = \frac{U_{S1}}{R_1} = \frac{U_{AB1}}{\omega_1 M_1} \end{cases} \quad (3.8)$$

З виразів для U_{S1} та I_{S1} можна обчислити вихідну потужність основного каналу як:

$$P_1 = I_{S1} U_{S1} = \frac{U_{AB1}^2 R_1}{\omega_1^2 M_1^2} \quad (3.9)$$

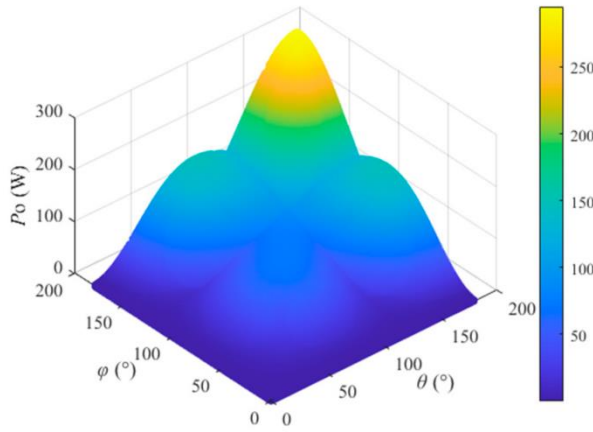
Аналогічно, вихідну потужність каналу третьої гармоніки можна обчислити наступним чином:

$$P_2 = I_{S2} U_{S2} = \frac{U_{AB3}^2 R_2}{9 \omega_1^2 M_2^2} \quad (3.10)$$

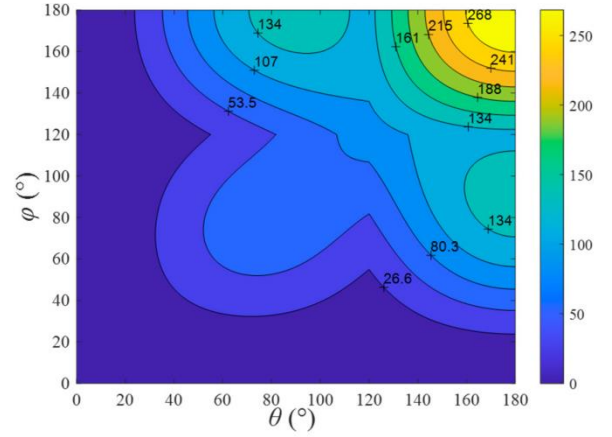
Загальна вихідна потужність системи дорівнює:

$$P_O = P_1 + P_2 = \frac{8R_L}{\pi^2} \left(\frac{3M_2 U_{AB1} + M_1 U_{AB3}}{3\omega_1 M_1 M_2} \right)^2 \quad (3.11)$$

Згідно з виразом (3.11), коли R_L , M_1 , M_2 та ω_1 визначені, P_O залежить лише від вихідної напруги інвертора, тому P_O можна вільно регулювати, змінюючи θ і ϕ .



(a)



(б)

Рис. 3.3. Зміна P_O залежно від θ і φ . (а) 3D графік; (б) Контурна карта.

Тривимірна візуалізація та контурні графіки, що показують зміну P_O залежно від θ і φ , наведені на рис. вище, де вхідна напруга постійного струму становить 180 В, взаємна індуктивність M_1 — 67 мкГн, M_2 — 22,4 мкГн, ω_1 — $170\,000\pi$ рад/с, а R_L — 10 Ом. З рис. 3.3 видно, що при одночасному збільшенні θ і φ також збільшується P_O , і багато різних комбінацій θ і φ можуть призвести до однакового P_O , що вказує на високий рівень керованості та ступінь свободи вихідної потужності системи.

Для звичайної системи WPT, яка має лише один основний канал на стороні прийому, вихідну потужність P_{OC} можна виразити як:

$$P_{OC} = \frac{8U_{AB1}^2 R_L}{\pi^2 \omega_1^2 M_1^2} \quad (3.12)$$

Для опису можливості підвищення потужності запропонованого методу вводиться параметр K , коефіцієнт підвищення потужності, який можна виразити як:

$$K = \frac{P_O - P_{OC}}{P_{OC}} = \frac{\left(\frac{3M_2 U_{AB1} + M_1 U_{AB3}}{3\omega_1 M_1 M_2} \right)^2 - \frac{U_{AB1}^2}{\omega_1^2 M_1^2}}{\frac{U_{AB1}^2}{\omega_1^2 M_1^2}} = \frac{6M_1 M_2 U_{AB1} U_{AB3} + M_1^2 U_{AB3}^2}{9M_2^2 U_{AB1}^2} \quad (3.13)$$

Згідно з виразом (3.13), можна побудувати тривимірну графіку та контурну мапу для коефіцієнта K , що змінюється в залежності від θ та φ , як показано на рис. 3.4. Як видно, порівняно з одноканальною системою, запропонований метод може ефективно збільшити вихідну потужність системи в усьому діапазоні вихідної потужності.

У діапазоні низької вихідної потужності запропонований метод може збільшити потужність більш ніж у п'ять разів, а в діапазоні високої вихідної потужності покращення може перевищити 50%.

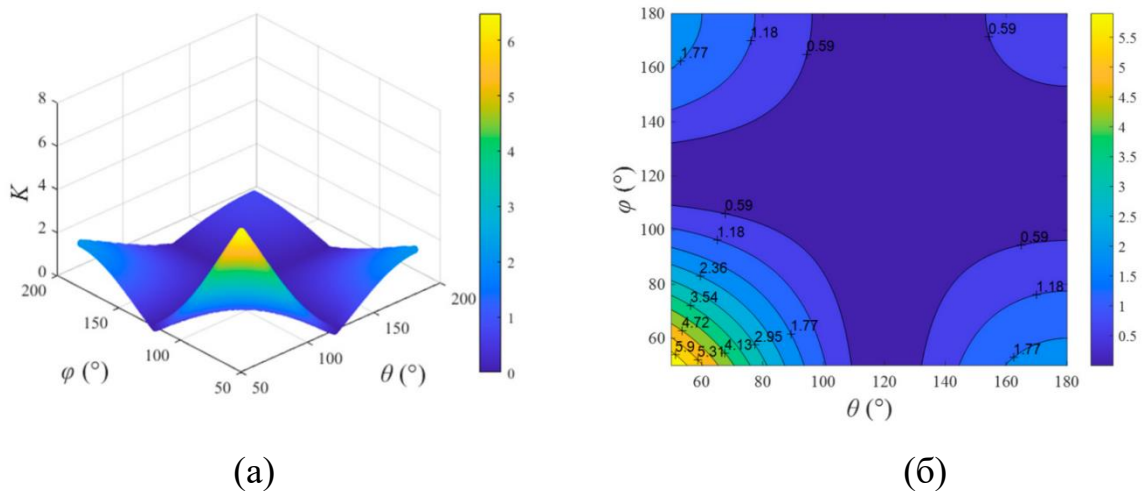


Рис. 3.4. Зміна K від θ та φ . (а) Тривимірна графіка; (б) Контурна мапа.

3.2. Аналіз ефективності системи

З рис. 3.4 можна побачити, що система буде генерувати контури P_O на площині, утвореній θ та φ . Тому одне з питань, яке потрібно вирішити, — це як вибрати відповідні значення θ та φ для досягнення вищої ефективності системи при однаковій потужності P_O .

Припустимо, що внутрішній резистор L_{P1} дорівнює R_P , а внутрішні резистори L_{S1} та L_{S2} — R_{S1} і R_{S2} відповідно. Тоді потужність втрат у механізмі зв'язку можна виразити як:

$$P_{\text{LOSS}} = I_P^2 R_P + I_{S1}^2 R_{S1} + I_{S2}^2 R_{S2} \quad (3.14)$$

де I_P — це значення RMS струму передавальної котушки, а його миттєве значення i_P складається з миттєвих значень основного струму i_{P1} та струму третьої гармоніки i_{P2} . Тому вираз для обчислення I_P виглядає наступним чином:

$$I_P = RMS(i_{P1} + i_{P2}) \quad (3.15)$$

де вирази для i_{P1} та i_{P2} можуть бути записані як:

$$\begin{cases} i_{P1} = \frac{u_{AB1}(t)}{Z_{O1}} = \frac{u_{AB1}(t)R_1}{\omega_1^2 M_1^2} = \frac{8ER_1}{\pi\omega_1^2 M_1^2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \sin(-\omega t + \frac{\theta}{2} + \frac{\varphi}{2}) \\ i_{P2} = \frac{u_{AB3}(t)}{Z_{O2}} = \frac{u_{AB3}(t)R_2}{9\omega_1^2 M_2^2} = \frac{8ER_2}{9\pi\omega_1^2 M_2^2} \sin \frac{3\theta}{2} \sin \frac{3\varphi}{2} \sin(-3\omega t + \frac{3\theta}{2} + \frac{3\varphi}{2}) \end{cases} \quad (3.16)$$

Тоді P_{LOSS} можна розписати як:

$$P_{LOSS} = (RMS(i_{P1} + i_{P2}))^2 R_P + \frac{U_{AB1}^2}{\omega_1^2 M_1^2} R_{S1} + \frac{U_{AB3}^2}{9\omega_1^2 M_2^2} R_{S2} \quad (3.17)$$

Нарешті, ефективність системи η дорівнює:

$$\eta = \frac{P_O}{P_O + P_{LOSS}} \times 100\% \quad (3.18)$$

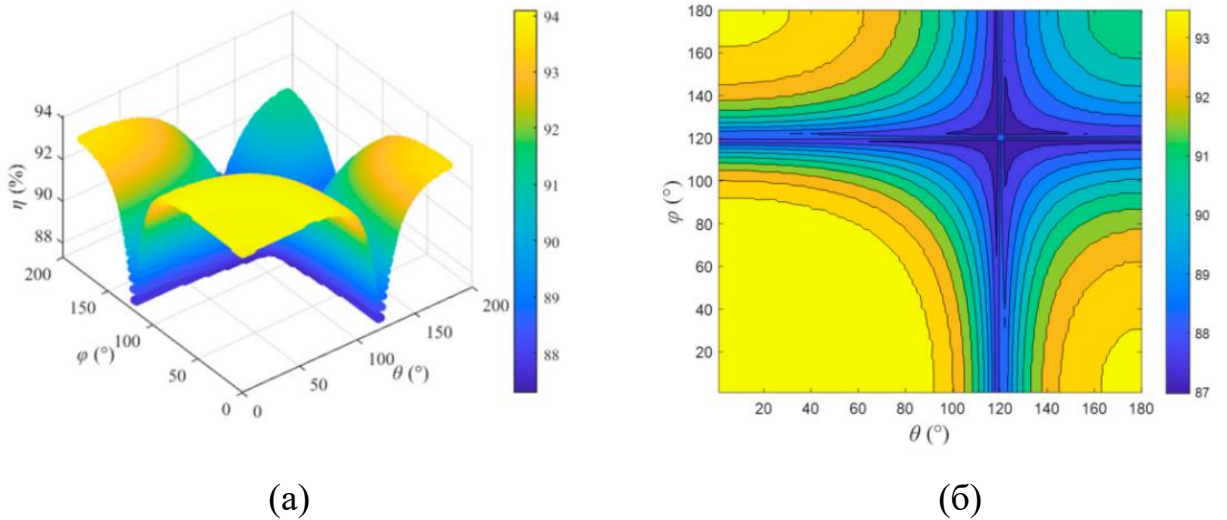


Рис. 3.5. Зміна η від θ та φ . (а) Тривимірна діаграма; (б) контурна діаграма.

Згідно з виразом (3.18), можна побудувати тривимірний графік та контурну карту ефективності системи η , що змінюється від θ та φ , як показано на рис. 3.5.

3.3. Вибір робочих точок інвертора

Запропонований метод покращує вихідну потужність системи шляхом використання гармонік. Тому для досягнення кращої продуктивності в системі, при виборі робочих точок інвертора, слід враховувати як ефективність системи, так і ККН (THD) вихідної напруги інвертора, оскільки висока ефективність і низький ККН є основними вимогами для інженерних застосувань. Згідно з виразом (3.1), вираз для ККН вихідної напруги інвертора можна записати так:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} U_{ABn}^2}}{U_{AB1}} \quad (3.19)$$

Згідно з виразом (3.19), тривимірний графік ККН вихідної напруги інвертора як функції θ та φ можна побудувати, як показано на рис. 3.6. З нього видно, що чим більші θ та φ , тим нижчий ККН. Коли ККН високий, вихідна напруга інвертора містить не тільки високу третю гармоніку, але й збільшується вміст п'ятої, сьомої та вищих гармонік.

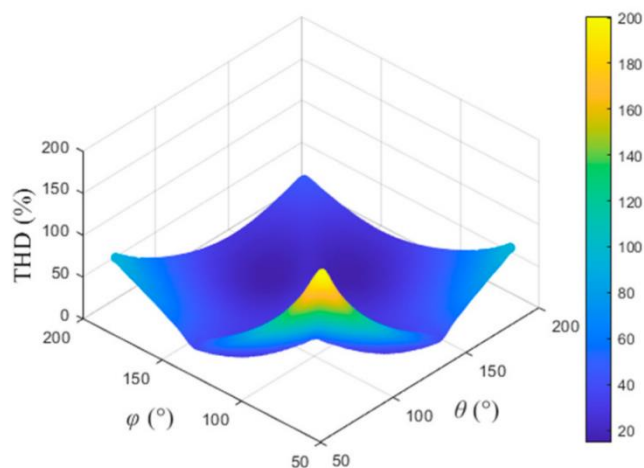


Рис. 3.6. Зміна ККН вихідної напруги інвертора залежно від θ та φ .

На основі проведеного аналізу можна побудувати тривимірну графіку залежності між вихідною потужністю системи, ефективністю системи та ККН вихідної напруги інвертора, як показано на рис. 3.7а. З цього можна зробити висновок, що в межах усієї ділянки вихідної потужності, чим вища ефективність, тим вищий ККН, що свідчить про їх суперечливість.

На низьких рівнях потужності ККН високий і може заважати безпечній роботі системи. Для покращення якості передачі потужності та забезпечення безпеки роботи інвертора і інших силових електронних пристроїв, правила вибору оптимальних робочих точок інвертора такі: коли вихідна потужність низька, вибирається точка, де ККН не перевищує 70%, а ефективність максимальна.

Коли вихідна потужність висока, максимальне значення ККН перебуває нижче 70%. У цьому випадку вибирається точка з максимальною ефективністю, що позначена червоним прямокутником на рис. 3.7б. Наприклад, при вихідній потужності 100 Вт, як показано на точках G1 та G2 на рисунку, вихідна потужність однакова, і ККН не перевищує 70%. Ефективність системи в точці G1 становить 90,2%, а ККН – 30%, тоді як ефективність системи в точці G2 – 92,8%, а ККН – 70%. Тому точка G2 вибирається як оптимальна робоча точка інвертора при вихідній потужності 100 Вт.

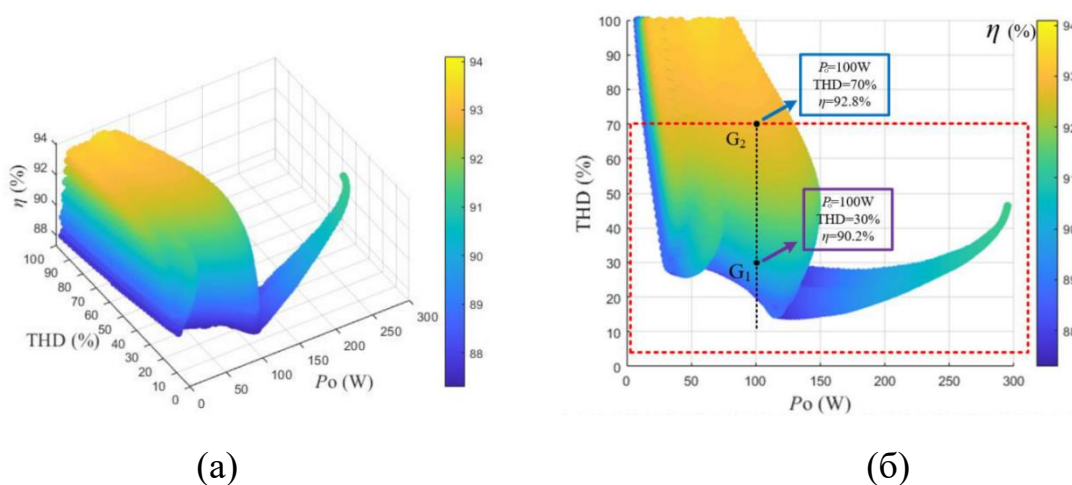


Рис. 3.7. (а) Тривимірна діаграма P_o , THD та η ; (б) вибір оптимальної робочої точки.

3.4 Перевірка результатів

На основі параметрів системи з таблиці 3.1 запропонований метод був змодельований і перевірений за допомогою платформи моделювання Matlab/Simulink 2023b.

Таблиця 3.1

Параметри системи

Параметри	Значення	Параметри	Значення
U_{in}/V	180	C_{S1}/nF	7
C_{P1}/nF	2.85	$L_{S2}/\mu H$	55.64
C_{P2}/nF	3.8	C_{S2}/nF	7
$L_{P1}/\mu H$	307.6	$M_1/\mu H$	67
$L_{P2}/\mu H$	410.2	$M_2/\mu H$	22.4
$C_1/\mu F$	220	R_p/Ω	0.35
$C_2/\mu F$	220	R_{S1}/Ω	0.6
$C_3/\mu F$	100	R_{S2}/Ω	0.25
$L_{S1}/\mu H$	500.85	R_L/Ω	10

Згідно з результатами аналізу в попередньому розділі, на робочій точці G_1 значення θ та ϕ встановлено на 67° та 152° відповідно. На робочій точці G_2 значення θ та ϕ встановлено на 57° та 164° відповідно. Сигнальні форми виявлені за допомогою симуляції наведені на рис. 3.8, де (а) — це симуляційні сигнали при робочій точці G_1 , а (б) — при робочій точці G_2 . З рисунка видно, що інвертор може генерувати різні п'ятиступінчасті вихідні напруги при різних параметрах модуляції. Вихідний струм інвертора складається переважно з основної та третьої гармонік. Вихідні струми основного та третього гармонійного каналів є синусоїдальними, і їхні частоти відрізняються втричі. При різних параметрах модуляції також змінюється вміст основної та третьої гармоніки у вихідній напрузі інвертора, тому величина струмів у приймальних каналах основної та третьої гармоніки також змінюється. Рисунок також показує навантажувальну напругу запропонованої системи та навантажувальну напругу традиційної одно-канальної WPT системи. З рисунка видно, що вихідна потужність системи покращується в певній мірі при двох різних робочих точках. Чим

вищий вміст третьої гармоніки, тим виразніше покращення потужності, але це також може впливати на THD вихідної напруги інвертора. Значення THD вихідної напруги інвертора при двох робочих точках показано на рис. 3.9, що відповідає теоретичному аналізу.

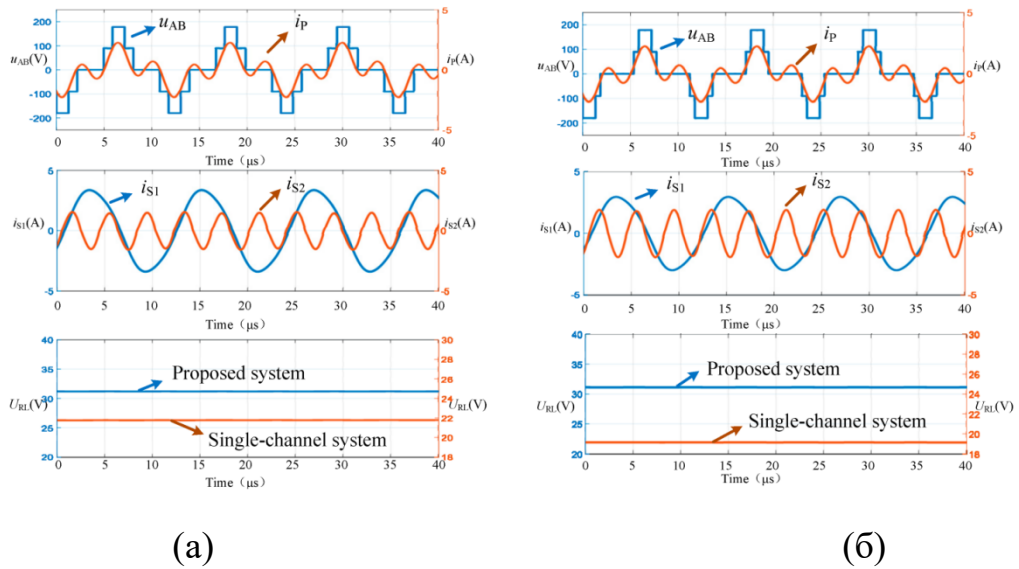


Рис. 3.8. Симуляційні форми сигналів. (a) Робоча точка G_1 ; (b) Робоча точка G_2 .

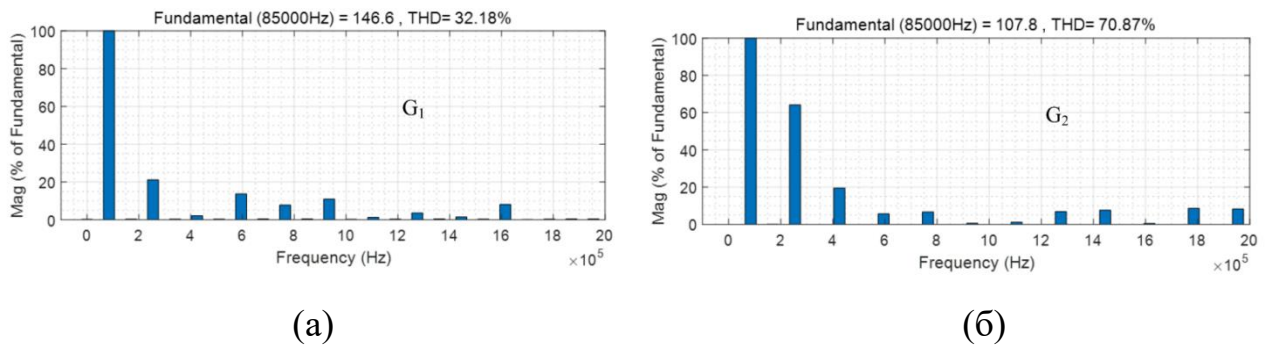


Рис. 3.9. Коефіцієнт гармонійних спотворень (THD) вихідної напруги інвертора. (a) Робоча точка G_1 ; (б) Робоча точка G_2 .

Згідно з таблицею 3.2, вхідна постійна напруга складає 180 В, коефіцієнт гармонійних спотворень (THD) вихідної напруги інвертора при робочій точці G_1 становить 32,18%, а при точці G_2 – 70,87%. При робочій точці G_1 запропонована система збільшує вихідну потужність з 67,6 Вт в одноканальній системі до 97,9 Вт з коефіцієнтом підвищення потужності близько 0,45. При точці G_2 вихідна потужність

системи збільшується з 49,7 Вт в одноканальній системі до 97,3 Вт з коефіцієнтом підвищення потужності близько 0,96. Потужність на точці G_2 перевищує потужність на точці G_1 . Хоча точка G_1 має нижчий THD, точка G_2 має сильнішу здатність до підвищення потужності та вищу ефективність системи. В межах допустимого значення THD точка G_2 відповідає оптимальній робочій точці, проаналізованій раніше, що підтверджує ефективність теоретичного аналізу.

Таблиця 3.2

Робочі параметри системи при двох робочих точках G_1 та G_2 .

Робочі точки	Вхідна постійна напруга (В)	THD вихідної напруги інвертора	Вихідна потужність запропонованої системи (Вт)	Вихідна потужність одно-канальної системи (Вт)	ККД	Коефіцієнт підвищення потужності
G_1	180	32.18%	97.9	67.6	89.5%	0.45
G_2	180	70.87%	97.3	49.7	92.2%	0.96

3.5. Висновки до розділу 3

Запропонований метод передачі енергії був створений і перевірений за допомогою платформи математичного моделювання Matlab/Simulink 2023b.

Результати симуляції показали, що запропонований метод збільшує ККД системи передачі енергії не збільшуючи коефіцієнту спотворень гармонік. За 2D та 3D візуалізаціями симуляційних форм сигналів при обраних робочих точках інвертора можна візуально та кількісно порівняти рівні потужності передачі та спотворень гармонік.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Психологічні причини нещасних випадків і травматизму

Перш за все необхідно розуміти поняття "нещасний випадок" та "травма". Детальне розуміння цих термінів є важливим для подальшого вивчення психологічних причин нещасних випадків і травматизму, загальні поняття наведені з підручника, [36].

Нещасний випадок базуватись на поняттях безпеки, ризику та випадковості. Нещасний випадок - це несподівана подія, яка призводить до негативних наслідків для здоров'я, життя або майна людини.

Нещасні випадки можуть бути класифіковані за різними критеріями. Наприклад, їх можна поділити на природні (наприклад, природні катастрофи), транспортні (аварії на дорогах, авіаційні аварії), промислові (вибухи, пожежі на виробництві) та побутові (падіння з висоти, отруєння).

Травма - це фізичне або психологічне ушкодження, яке може виникнути внаслідок нещасного випадку або насильства. Вона може мати негативний вплив на фізичне та психічне здоров'я людини.

Травми можна класифікувати на фізичні та психологічні. Фізичні травми включають порізи, переломи, опіки тощо. Психологічні травми пов'язані з емоційними та психологічними наслідками нещасного випадку, такими як посттравматичний стресовий розлад (ПТСР), тривожність, депресія тощо.

Нещасні випадки не завжди є випадковими подіями, і психологічні фактори можуть відігравати важливу роль у виникненні таких ситуацій. У цьому розділі досліджується вплив різних психологічних факторів на наше поведінка та реакцію в ситуаціях небезпеки.

Недбалість може виникати внаслідок відволікання, втоми, невпевненості або недостатньої уваги до безпеки. Психологічні фактори, такі як нестабільність уваги,

несистематичність або недостатня свідомість, можуть підвищувати ризик необережності та призводити до нещасних випадків.

Відсутність уваги може заважати правильному сприйняттю оточуючого середовища та виявленню потенційних небезпек. Недостатня увага може призводити до помилок, необачності та неправильних рішень, що збільшують ризик нещасних випадків.

Стресові ситуації можуть впливати на нашу здатність уважно сприймати і обробляти інформацію. Високий рівень стресу може знизити нашу концентрацію та погіршити реакційність, що зробить нас більш уразливими перед нещасними випадками.

Наш емоційний стан може впливати на спосіб, яким ми реагуємо на небезпеку. Наприклад, паніка, страх або злість можуть призвести до неадекватних дій або ризикованого поведінки, що збільшує ймовірність нещасних випадків.

Недосвідченість і відсутність необхідних навичок можуть призводити до помилок і незнання ефективних стратегій безпеки. Недостатня підготовка може зробити людину більш уразливою перед нещасними випадками, особливо в ситуаціях, де вимагається швидка реакція.

Відповідне навчання та підготовка можуть допомогти людям розпізнати небезпеку, оцінювати ризики та уникати потенційно небезпечних ситуацій. Чим більше знань та навичок має людина щодо безпеки, тим менше ймовірність виникнення нещасних випадків.

Травми можуть мати не тільки фізичні, але й психологічні причини. У цьому розділі досліджується роль психологічних факторів у виникненні травматичних подій та наслідків, які вони можуть мати на психічне та емоційне здоров'я людини.

Стресові ситуації, такі як природні катастрофи, конфлікти, насильство або травматичні життєві події, можуть сприяти виникненню травматичних подій. Високий рівень стресу може знизити нашу здатність до розумного мислення та прийняття рішень, що збільшує ризик потрапляння у травматичні ситуації.

Сильні стресові події можуть мати довготривалі психологічні наслідки, такі як посттравматичний стресовий розлад (ПТСР), тривожність, депресія, порушення сну та

інші психічні проблеми. Ці наслідки можуть бути настільки серйозними, що суттєво впливають на якість життя та функціонування постраждалих осіб.

Небезпечні та насильницькі міжособистісні відносини, такі як домашнє насильство або злочини, можуть призводити до серйозних травматичних наслідків. Психологічні чинники, такі як низька самооцінка, відчуття безпорадності або залежність від насильника, можуть утримувати постраждалих осіб у шкідливих відносинах, що збільшує ризик травматизму.

Психічні порушення, такі як розлади настрою, розлади особистості або зловживання речовинами, можуть збільшувати ризик потрапляння у травматичні ситуації. Ці порушення можуть впливати на когнітивні та емоційні процеси, а також на прийняття рішень, знижуючи здатність до самозбереження та уникнення небезпек.

Поведінкові чинники, такі як зловживання алкоголем, наркотиками або небезпечна їзда, можуть бути пов'язані з психологічними причинами травматизму. Ці фактори можуть знижувати нашу увагу, координацію рухів та реакційність, що збільшує ймовірність потрапляння у травматичні ситуації.

Деякі особистісні особливості, такі як нестабільність, впевненість у власній недостатності або пошук нових вражень, можуть підвищувати ризик потрапляння у травматичні ситуації. Психологічна налаштованість може впливати на сприйняття та оцінку ризиків, а також на реакцію на потенційно небезпечні ситуації.

У підсумку можна підкреслити, що психологічні причини нещасних випадків і травматизму включають різні аспекти, що взаємодіють між собою. Серед них можна виділити:

- Поведінкові фактори.
- Емоційні стани.
- Недосвідченість та недостатня підготовка.
- Психосоціальні фактори.

Враховуючи ці фактори, важливо розвивати свідомість та підвищувати рівень психологічної грамотності серед населення. Це може бути досягнуто шляхом освіти, тренувань і навчання психологічним аспектам безпеки та усвідомлення ризиків.

Застосування психологічних підходів у превентивних програмах та заходах з безпеки може сприяти зниженню частоти нещасних випадків і травматизму.

4.2. Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання

Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів є невід'ємною частиною розробки друкованих плат і мають на меті забезпечити безпечне та ефективне виробництво, запобігти аваріям та нещасним випадкам, а також гарантувати відповідність встановленим стандартам якості та нормам безпеки, [41].

Дотримання цих вимог сприяє забезпеченню безпеки працівників, збереженню виробничого обладнання, якісному та надійному виготовленню продукції. Нижче будуть описані загальні вимоги безпеки при розробці друкованих плат.

Оцінка ризиків є першим етапом встановлення вимог безпеки при розробці друкованих плат. Цей етап включає ідентифікацію потенційних небезпек, які можуть виникнути під час використання виробничого обладнання та проведення технологічних процесів.

Під час оцінки ризиків необхідно враховувати можливість виникнення аварійних ситуацій, травм та негативних впливів на здоров'я працівників. Важливо аналізувати можливі наслідки цих ризиків та їх потенційний вплив на безпеку та здоров'я працівників.

Під час оцінки ризиків також варто враховувати вимоги нормативно-правових актів, які стосуються виробництва радіо- та електронної апаратури, [40]. Вимоги щодо застосування захисного спорядження, правил роботи з обладнанням та виконання процедур безпеки також включаються до оцінки ризиків.

Оцінка ризиків є необхідним етапом, щоб усвідомити можливі небезпеки, що виникають при розробці друкованих плат, та прийняти відповідні заходи для запобігання аваріям, травмам та забезпечення безпеки працівників.

Одним з важливих кроків у встановленні вимог безпеки при розробці друкованих плат є розробка безпечного середовища. Цей пункт орієнтований на створення умов, які мінімізують ризики для працівників та забезпечують їхню безпеку

під час роботи з виробничим обладнанням та виконання технологічних процесів. При проектуванні безпечного середовища потрібно враховувати різні чинники та дотримуватись державних санітарних норм з шуму, [38], вібрації (локальної та загальної), [39], мікроклімату виробничих приміщень, [40].

Проектування безпечного середовища має на меті створення умов, які забезпечують безпеку працівників під час роботи з виробничим обладнанням та технологічними процесами. Це включає проектування робочих місць, встановлення систем безпеки, використання безпечного обладнання та забезпечення належного навчання працівників.

Безпека електротехнічного обладнання є одним з найважливіших аспектів у забезпеченні безпеки при розробці друкованих плат. Врахування вимог безпеки щодо електротехнічного обладнання має на меті запобігання ризикам електричного ураження, пожеж та інших небезпечних ситуацій.

При проектуванні безпеки електротехнічного обладнання необхідно враховувати наступні аспекти:

- Відповідність стандартам безпеки. Електротехнічне обладнання повинно відповідати вимогам національних та міжнародних стандартів безпеки, [36]. Це означає, що обладнання має бути виготовлене з урахуванням безпечних матеріалів, мати правильне електричне заземлення, надійні захисні пристрої, ізоляцію тощо.

- Правильна експлуатація та обслуговування. Електротехнічне обладнання повинно бути правильно встановлене, підключене та обслуговуватися відповідно до інструкцій та рекомендацій виробника. Регулярна перевірка, технічне обслуговування та проведення поточного ремонту допомагають підтримувати безпеку обладнання на високому рівні.

- Захист від електричного ураження. Електротехнічне обладнання повинно бути захищене від можливості електричного ураження. Це включає встановлення захисних пристроїв, таких як автоматичні вимикачі, заземлення, ізоляцію проводів та інші заходи для забезпечення безпеки працівників.

- Інформаційні покажчики та попереджувальні знаки. Електротехнічне обладнання повинно мати належну інформаційну позначення, які надають необхідну

інформацію про його використання, ризики та заходи безпеки. Попереджувальні знаки та маркування повинні бути видимими та зрозумілими для працівників.

Безпека роботи з хімічними речовинами є надзвичайно важливою при розробці друкованих плат, оскільки використання різних хімічних речовин може бути необхідним у процесі виготовлення та обробки плат. Дотримання правил безпеки допомагає уникнути потенційних небезпек, які пов'язані з взаємодією з хімічними речовинами.

При роботі з хімічними речовинами необхідно враховувати наступні аспекти.

- Відповідність вимогам безпеки. Потрібно ознайомитися з властивостями хімічних речовин та визначити, які заходи безпеки потрібно вжити для їх правильного використання.

- Особистий захист. Працівники, які працюють з хімічними речовинами, повинні бути обладнані відповідними засобами індивідуального захисту, такими як захисні окуляри, рукавиці, маски тощо. Це допомагає уникнути проникнення речовин на шкіру, очі та дихальні шляхи.

- Правильне зберігання та утилізація. Хімічні речовини повинні бути зберігані у відповідних контейнерах, які позначені інформацією про їх вміст та правилах безпеки.

- Належне проведення робіт. Робота з хімічними речовинами повинна проводитися в добре провітрюваних приміщеннях або під контролем витяжної вентиляції, щоб уникнути накопичення шкідливих парів.

Контроль та перевірка є необхідною складовою частиною процесу розробки друкованих плат. Цей пункт орієнтований на забезпечення безпеки виробничого обладнання та процесів, а також відповідності виробництва встановленим нормам та стандартам якості.

4.3 Висновок до розділу 4

Визначено, що психологічні фактори, такі як недбалість, відсутність уваги, стресові ситуації, недосвідченість та відсутність необхідних навичок, суттєво

впливають на ризик виникнення нещасних випадків та травматизму. Показано, що емоційний стан, поведінкові чинники та психосоціальні обставини можуть значно збільшити ймовірність потрапляння у травматичні ситуації.

Обґрунтовано, що підвищення рівня психологічної грамотності серед населення, організація навчальних програм з усвідомлення ризиків і розвитку навичок безпеки можуть зменшити кількість нещасних випадків.

Розглянуто загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів, які спрямовані на зменшення ризиків для працівників та забезпечення безпечного середовища.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі представлено результати дослідження та розробки системи бездротової передачі енергії, що базується на мультирівневому інверторі та двоєдиній резонансній мережі.

Здійснено аналіз відомих систем передачі енергії безпроводним шляхом. Встановлено, що сучасні методи, зокрема магнітно-кореляційні та імпедансні підходи, мають низку переваг, проте обмежені у гнучкості й адаптації до змінних умов експлуатації. Показано необхідність використання мультирівневих інверторів для підвищення ефективності та стабільності передачі енергії.

Проведено аналіз застосування резонансних систем у передачі енергії. Виявлено, що двоєдині резонансні мережі дозволяють забезпечити передачу енергії на кількох частотах, знижуючи втрати енергії та покращуючи продуктивність системи. Досліджено їхню здатність адаптуватися до змінних параметрів навантаження та відстаней між передавальними і приймальними елементами.

Розроблено математичний метод та алгоритм передачі енергії за допомогою модифікованої системи передачі енергії. Запропоновано алгоритм синхронізації гармонік п'ятиступінчастого інвертора та налаштування двоєдиної резонансної мережі, що забезпечує передачу енергії на основній та третій гармоніках. Алгоритм дозволяє враховувати змінні параметри системи та забезпечувати її стабільну роботу.

Виконано оцінку роботи системи за допомогою моделювання в середовищі MATLAB. Встановлено, що розроблений метод забезпечує підвищення вихідної потужності системи до 50% порівняно з одноканальними аналогами, а також високу стабільність роботи за різних умов експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Feng, H.; Tavakoli, R.; Onar, O.C.; Pantic, Z. Advances in High-Power Wireless Charging Systems: Overview and Design Considerations. *IEEE Trans. Transp. Electrification*. 2020, 6, 886–919.
2. Zhang, Y.; Pan, W.; Wang, H.; Shen, Z.; Wu, Y.; Dong, J.; Mao, X. Misalignment-Tolerant Dual-Transmitter Electric Vehicle Wireless Charging System with Reconfigurable Topologies. *IEEE Trans. Power Electron.* 2022, 37, 8816–8819.
3. Liu, Y.; Li, Y.; Zhang, X.; He, Z. Load-Independent Voltage-Gain Design Method for Domino-Resonator Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 2024, 39, 1997–2003.
4. Xia, C.; Zhang, H.; Wei, N.; Zhao, S.; Yan, J.; Song, X.; Xiang, L.; Liao, Z. Simultaneous Wireless Power and Multibit Signals Transfer System with Hybrid Modulation Waves PWM Control. *IEEE Trans. Power Electron.*
5. Zhou, Y.; Zhang, Z.; Dong, P.; Chen, Y.; Huang, L. Simultaneous Wireless Power and Data Transmission Based on Unsymmetrical Current Waveforms with Duty Cycle Modulation. *IEEE Access* 2020, 8, 16495–16504.
6. Cairo, J.I.; Bonache, J.; Paredes, F.; Martin, F. Reconfigurable System for Wireless Power Transfer (WPT) and Near Field Communications (NFC). *IEEE J. Radio Freq. Identif.* 2017, 1, 253–259.
7. Jiang, J.; Li, Z.; Song, K.; Song, B.; Dong, S.; Zhu, C. A Cascaded Topology and Control Method for Two-Phase Receivers of Dynamic Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Access* 2020, 8, 47445–47455.
8. Kung, M.-L.; Lin, K.-H. A Dual-Band Wireless Power Transfer System with Efficiency-Boosting Converter. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* 2020, 30, 1108–1111.
9. Le-Huu, H.; Seo, C. A Hybrid Transmitting Coil for Improving Angular Freedom of a Wireless Power Transfer System. *IEEE Microw. Wireless Technol. Lett.* 2024, 34, 119–122.

10. Dan, Z.; He, Z.; Lin, H.; Liu, C. A Patch Rectenna with an Integrated Impedance Matching Network and a Harmonic Recycling Filter. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2022, 21, 2085–2089.
11. Dai, X.; Li, X.; Hu, A.P. Impedance-Matching Range Extension Method for Maximum Power Transfer Tracking in IPT System. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018, 33, 4419–4428.
12. Chung, E.; Ha, J.-I. Impedance Matching Network Design for 6.78-MHz Wireless Power Transfer System with Constant Power Characteristics Against Misalignment. *IEEE Trans. Power Electron.* 2024, 39, 1788–1801.
13. Esfahani, F.N.; Madani, S.M.; Niroomand, M.; Safaei, A. Maximum Wireless Power Transmission Using Real-Time Single Iteration Adaptive Impedance Matching. *IEEE Trans. Circuits Syst. I* 2023, 70, 3806–3817.
14. Wu, J.; Dai, X.; Sun, Y.; Li, Y. A Node Role Dynamic Change Method Among Repeater, Receiver, and Decoupling Using Topology Switching in Multinode WPT System. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021, 36, 11174–11182.
15. Wu, J.; Dai, X.; Gao, R.; Jiang, J. A Coupling Mechanism with Multidegree Freedom for Bidirectional Multistage WPT System. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021, 36, 1376–1387.
16. Wang, L.; Li, J.; Chen, H.; Pan, Z. Radial-Flux Rotational Wireless Power Transfer System with Rotor State Identification. *IEEE Trans. Power Electron.* 2022, 37, 6206–6216.
17. Shu, X.; Zhang, B.; Wei, Z.; Rong, C.; Sun, S. Extended-Distance Wireless Power Transfer System with Constant Output Power and Transfer Efficiency Based on Parity-Time-Symmetric Principle. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021, 36, 8861–8871.
18. Gao, X.; Liu, C.; Zhou, H.; Hu, W.; Huang, Y.; Xiao, Y.; Lei, Z.; Chen, J. Design and Analysis of a New Hybrid Wireless Power Transfer System with a Space-Saving Coupler Structure. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021, 36, 5069–5081.
19. Guo, Z.; Yang, F.; Zhang, H.; Wu, X.; Wu, Q.; Zhu, K.; Jiang, J.; Jiang, H.; Yang, Y.; Li, Y.; et al. Level Pinning of Anti-PT-Symmetric Circuits for Efficient Wireless Power Transfer. *Natl. Sci. Rev.* 2024, 11, 215–224.

20. Liu, H.; Wang, Y.; Yu, H.; Wu, F.; Wheeler, P. A Novel Three-Phase Omnidirectional Wireless Power Transfer System with Zero-Switching-Loss Inverter and Cylindrical Transmitter Coil. *IEEE Trans. Power Electron.* 2023, 38, 10426–10441.
21. Chowdhury, S.; Tarek, M.T.B.; Haque, M.E.; Sozer, Y. A Three-Phase Overlapping Winding–Based Wireless Charging System for Transportation Applications. *IEEE Trans. Power Electron.* 2023, 38, 16245–16255.
22. Song, C.; Kim, H.; Kim, Y.; Kim, D.; Jeong, S.; Cho, Y.; Lee, S.; Ahn, S.; Kim, J. EMI Reduction Methods in Wireless Power Transfer System for Drone Electrical Charger Using Tightly Coupled Three-Phase Resonant Magnetic Field. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2018, 65, 6839–6849.
23. Mehta, P.; Sahoo, S.; Bharadwaj, P. Fault Tolerant High-Frequency Multilevel Inverter for Wireless EV Charging. In *Proceedings of the 2023 IEEE 3rd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, Bhubaneswar, India, 10–13 December 2023; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2023; pp. 1–6.
24. Lee, E.-J.; Lee, K.-B. Modulation Methods based on Phase-Shifted PWM for H- Bridge Multilevel Inverters. In *Proceedings of the 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, Seoul, Republic of Korea, 15–19 November 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 189–193.
25. Zhang, Z.; Li, X.; Pang, H.; Komurcugil, H.; Liang, Z.; Kennel, R. Multiple-Frequency Resonating Compensation for Multichannel Transmission of Wireless Power Transfer. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021, 36, 5169–5180.
26. Li, X.; Zhang, Z.; Si, W.; Wang, R.; Liang, Z. Analysis and Optimization of Equivalent Load for Multichannel Transmission of Wireless Power Transfer. *IEEE Trans. Magn.* 2021, 57, 1–6.
27. Ibrahim, A.U.; Zhong, W.; Xu, M.D. A 50-kW Three-Channel Wireless Power Transfer System with Low Stray Magnetic Field. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021, 36, 9941–9954.
28. Liang, Y.; Sun, P.; Yang, G.; Sun, J.; Cai, J.; Wu, X.; Deng, Q. Analysis and Parameter Design for Input-Series Output-Series (ISOS) Multichannel Inductive Power

Transfer System Considering Cross Coupling. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2024, 12, 2361–2376.

29. Хвостівський М.О., Дунець В.Л., Дедів І.Ю. Методичні рекомендації з оформлення кваліфікаційних робіт магістра за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. 21 с.

30. Розвиток математичного моделювання трафіку комп'ютерних мереж / М. О. Хвостівський, Г. М. Осухівська, Л. В. Хвостівська, Д. В. Величко // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. Т.: ТНТУ, 2020. С. 187–188.

31. Хвостівська Л.В., Хвостівський М.О. Синтез структури інформаційної системи реєстрації та обробки пульсового сигналу. Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 4, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2015. – С. 83-89. – ISSN 2227-8842.

32. Хвостівська Л.В., Дедів І.Ю., Ісаєнко Д.В. Генерування радіосигналів для тестування програмного забезпечення комп'ютерних радіосистем. Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей VIII міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 27–28 листоп. 2019.) М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. Тернопіль : ТНТУ, 2019. С. 108-109.

33. Hvostivska L., Oksukhivska H., Hvostivskyu M., Shadrina H. (2019) Імітаційне моделювання добового пульсового сигналу для задачі верифікації алгоритмів роботи систем довготривалого моніторингу, Вісник НТУУ "КПІ"; Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (77), pp 66-73.

34. Mathematical modelling of daily computer network traffic. Khvostivskyu M., Osukhivska H., Khvostivska L., Lobur T., Velychko D, Lupenko S., Hovorushchenko, T. 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2021, Ternopil. 16 November 2021 до 18 November 2021. CEUR Workshop Proceedings. Том 3039, P.107-111.

35. Хвостівська Л.В., Хвостівський М.О. Синтез структури інформаційної системи реєстрації та обробки пульсового сигналу. Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 4, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2015. – С. 83-89. – ISSN 2227-8842.
36. НПАОП 32.0-1.02-14 “Правила охорони праці під час виробництва радіо- та електронної апаратури”
37. ДСН 3.3.6.037 – 99 „Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку”.
38. ДСН 3.3.6.039 – 99 „Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації”.
39. ДСН 3.3.6.042 – 99 „Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень”.
40. Атаманчук П.С. Безпека життєдіяльності. Навчальний посібник. - К.: Основа, 2017, с.437.
41. Запорожець О.І. Основи охорони праці. – К.: ВД Центр навчальної літератури (ЦНЛ), 2019, с. 560.
42. Liliia Khvostivska, Mykola Khvostivskyi, Vasyl Dunets, Iryna Dediv. Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio signals in electronic communication networks with noises. Scientific Journal of TNTU. Tern.: TNTU, 2023. Vol 111. No 3. P. 48–57.
43. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dediv I., Yatskiv V., Palaniza Y. Method, Algorithm and Computer Tool for Synphase Detection of Radio Signals in Telecommunication Networks with Noises. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.173-180. ISSN 1613-0073.
44. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunetc V., Dediv I. Mathematical and Algorithmic Support of Detection Useful Radiosignals in Telecommunication Networks. Proceedings of the 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical

and Applied Problems (ITTAP 2022). Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2022. P.314-318. ISSN 1613-0073.

45. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dediv I. Mathematical, algorithmic and software support for signals wavelet detection in electronic communications. Proceedings of the 2nd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2024). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2024. Vol. 3742. P.223-234. ISSN 1613-0073.

ДОДАТОК А

Копія тези

УДК 621.311.6

М.Б. Слабковський; Л.В. Хвостівська, к.т.н, доцент

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ДІОДНИЙ КЛАСТЕРНИЙ П'ЯТИСТУПІНЧАСТИЙ ІНВЕРТОР

M.B. Slabkowski, L.V. Khvostivska, PhD

DIODE-CLAMPED FIVE-LEVEL INVERTER

Діодний кластерний п'ятиступінчастий інвертор (ДКПІ) є перспективним рішенням для перетворення електричної енергії, яке поєднує високу ефективність та простоту конструкції [1]. Основою роботи інвертора є каскадна топологія з використанням п'яти ступенів, де кожен ступінь забезпечує формування багаторівневого вихідного сигналу із низьким рівнем загального гармонічного спотворення (THD).

Особливістю п'ятиступінчастої конструкції є оптимальний баланс між кількістю компонентів і якістю вихідного сигналу. Застосування діодів у кожному ступені дозволяє ефективно керувати струмом і мінімізувати електромагнітні завади. Використання п'яти рівнів напруги забезпечує плавну форму вихідного сигналу, що є важливим для застосувань у системах із чутливими електронними пристроями.

Унікальність п'ятиступінчастого ДКПІ полягає у його здатності забезпечувати високоякісне перетворення енергії за умов помірної складності конструкції. Це робить його ефективним рішенням для сучасних систем живлення, де важливі як економічність, так і енергетична ефективність. В таблиці 1 наведено порівняння параметрів існуючих топологій різних інверторів.

Таблиця 1. Показники ККД та коефіцієнту рівня загального гармонічного спотворення різних топологій інверторів

№ п/п	Тип інвертора	THD%	ККД, %
1	Діодний кластерний (ДКІ)	2.5	96.8
2	Каскадний H-мостовий інвертор	3.1	94.5
3	Інвертор із діодними обмежувачами	2.8	95.2
4	Модулярний багаторівневий	2.4	95.8

Як свідчать дані, наведені у таблиці 1, діодний кластерний п'ятиступінчастий інвертор демонструє конкурентні показники загального гармонічного спотворення (THD) на рівні 2.5% і високий коефіцієнт корисної дії (96.8%), перевершуючи більшість альтернативних топологій [2, 3] за простотою конструкції.

Схема діодного кластерного п'ятирівневого інвертора показана на рисунку 1, яка включає плечі мостової схеми 1 (жовте поле) та 2 (блакитне поле). Плече мостової схеми 1 генерує три рівні напруги u_{BO} через почергове комутування ключів Q_1 – Q_4 , а плече мостової схеми 2 генерує три рівні напруги u_{AO} через почергове комутування ключів Q_5 – Q_6 . Віднімання двох три-рівневих напруг дозволяє отримати п'ятирівневу вихідну напругу u_{AB} .

Згідно з вищевказаним, формула для обчислення u_{AB} виглядає наступним чином:

$$u_{AB}=u_{AO}-u_{BO} \quad (1)$$

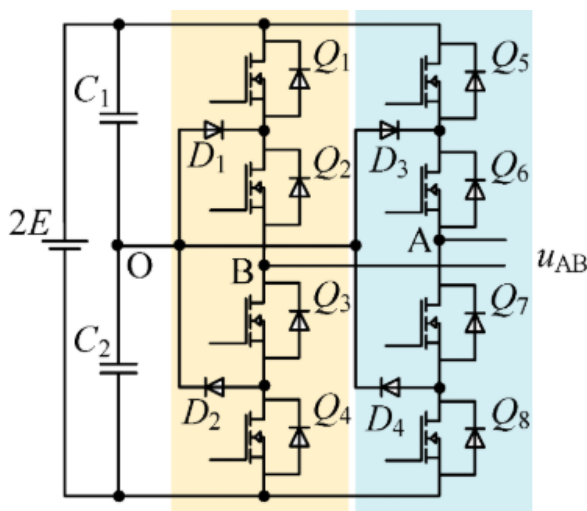


Рисунок 1. Схема діодно-класпованого п'ятирівневого інвертора

Для плеча мостової схеми 1 та плеча мостової схеми 2 форми сигналів їх вихідних напруг u_{BO} та u_{AO} можуть бути виражені за допомогою розкладу Фур'є наступним чином:

$$\begin{cases} u_{BO}(t) = \sum_{n=2k-1}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \sin \frac{n\theta}{2} \cos(n\omega t - \frac{n\theta}{2}) \\ u_{AO}(t) = \sum_{n=2k-1}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \sin \frac{n\theta}{2} \cos(n\omega t - \frac{n\theta}{2} - n\varphi) \end{cases} \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (2)$$

де n - порядок гармоніки, t - час роботи системи, а ω - робоча кутова частота інвертора. Тоді, згідно з рівняннями (1) і (2), п'ятирівнева вихідна напруга може бути обчислена як:

$$u_{AB}(t) = \sum_{n=2k-1}^{\infty} \frac{8E}{n\pi} \sin \frac{n\theta}{2} \sin(\frac{n\varphi}{2}) \sin(-n\omega t + \frac{n\theta}{2} + \frac{n\varphi}{2}) \quad (3)$$

З виразу (3) видно, що при заданій входній постійній напрузі інвертора його вихідна напруга залежить від робочого циклу (θ) вихідної напруги двох плечей мостової схеми та фазової різниці (φ) між двома плечами.

Література

1. Mehta, P.; Sahoo, S.; Bharadwaj, P. Fault Tolerant High-Frequency Multilevel Inverter for Wireless EV Charging. NJ, USA, 2023; с. 1–6.
2. Lee, E.-J.; Lee, K.-B. Modulation Methods based on Phase-Shifted PWM for H- Bridge Multilevel Inverters. Seoul, Republic of Korea, 15–19 November 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; с. 189–193.
3. J. Rodríguez, J. S. Lai and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies controls and applications", IEEE Trans. Ind. Electron., с. 724-738, 2002.

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Метод підвищення вихідної потужності електронних комунікаційних систем для безпроводної передачі енергії» // Кваліфікаційна робота // Слабковський Максим Богданович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, група РАМ-61 // Тернопіль, 2024 // с. – 56, рис. – 12, табл. – 2, додат. – 1, бібліогр. – 35.

Ключові слова: бездротова передача енергії; підвищення потужності; використання гармонік; двоканальна передача енергії; двоконтурна резонансна мережа.

У роботі представлено результати розробки методу та системи для бездротової передачі енергії, що базується на п'ятиступінчастому мультирівневому інверторі та двоєдиній резонансній мережі.

На основі гармонійного аналізу та синхронізації частот розроблено метод та алгоритм передачі енергії, що дозволяє ефективно використовувати основну та третю гармоніки для підвищення продуктивності системи. Запропонований підхід забезпечує адаптацію системи до змінних умов експлуатації, таких як відстань між передавачем і приймачем, та оптимізацію енергетичних характеристик.

Розроблено в середовищі MATLAB математичну модель та симуляцію роботи системи. Встановлено, що використання п'ятиступінчастого інвертора та двоєдиної резонансної мережі дозволяє збільшити вихідну потужність системи на 50% порівняно з традиційними підходами, забезпечуючи високу ефективність та стабільність передачі енергії.

Отримані результати підтверджують можливість широкого використання розробленої системи для покращення бездротових технологій передачі енергії в різних галузях, включаючи побутову електроніку, промислові установки та зарядні пристрої для електромобілів.

ANNOTATION

Topic of the qualification thesis: "A Method for Enhancing Output Power in Electronic Communication Systems for Wireless Power Transfer" // Qualification Thesis // Maksym Bohdanovych Slabkovskyi // Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Group RAm-61 // Ternopil, 2024 // pages: – 56, figures: – 12, tables: – 2, appendices: – 1, references: – 35.

Keywords: wireless power transfer; power boosting; harmonic utilization; dual-channel power transfer; dual-resonant network.

The thesis presents the results of developing a method and system for wireless power transfer based on a five-level multilevel inverter and a dual-resonant network.

A method and algorithm for energy transfer were developed based on harmonic analysis and frequency synchronization, enabling efficient utilization of the fundamental and third harmonics to enhance system performance. The proposed approach ensures system adaptability to varying operating conditions, such as the distance between transmitter and receiver, and optimizes energy characteristics.

A mathematical model and system simulation were developed using MATLAB. It was established that employing a five-level inverter and a dual-resonant network increases system output power by 50% compared to traditional approaches, ensuring high efficiency and stable power transfer.

The results confirm the potential for widespread application of the developed system to improve wireless power transfer technologies in various fields, including consumer electronics, industrial installations, and charging devices for electric vehicles.