

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **МОДЕРНІЗАЦІЯ БЕЗПРОВІДНОЇ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ  
ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Виконав студент VI курсу, групи ЕЕм-61  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_  
(підпис) Левчук П.П.  
(прізвище та ініціали)

Керівник \_\_\_\_\_  
(підпис) Коваль В.П.  
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_  
(підпис) Вакуленко О.О.  
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис) Тарасенко М.Г.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(підпис) Габрусев Г.В.  
(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2020

---

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 77 сторінок, формати А1, 41 ілюстрацію та 51 використане першоджерело.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи: підвищити ефективність, надійність та стійкість до взаємозміщень індуктивно-зв'язаних котушок системи передачі енергії у бездротовій зарядці електричного транспортного засобу.

Запропоновано систему безпроводної передачі енергії для бездротової зарядки акумулятора електричного велосипеда, і особливу увагу приділено магнітним та електричним колам. Проведено аналітичне дослідження типової двонаправленої системи безпроводної передачі енергії. Запропоновано алгоритм керування для максимізації ефективності передачі потужності. Досліджено різне конструктивне виконання котушок за допомогою програмного забезпечення: 3D-магнітного симулятора.

**Ключові слова:** СИСТЕМИ БЕЗПРОВІДНОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ, КОТУШКА, ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРА, ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ

## ЗМІСТ

### ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	9
1.1 Бездротова зарядка для транспортних засобів малої потужності.....	9
1.1.1 Бездротові сенсорні мережі.....	9
1.1.2 Побутові електронні пристрої та побутова техніка.....	10
1.2 Бездротова зарядка для електромобілів.....	11
1.2.1 Бездротова передача потужності для електричного велосипеда.....	12
1.2.2 БПЕ для електромобілів .....	13
1.2.3 БПЕ для електричних автобусів та залізничного транспорту.....	16
1.3 БПЕ. Опис системи .....	17
1.3.1 Компенсаційна ланка .....	18
1.3.2 Перетворювачі потужності .....	19
1.3.2.1 Перетворення DC-AC в первинному колі .....	20
1.3.2.2 AC-DC перетворювач у вторинному колі .....	21
1.3.3 Акумулятор .....	23
1.4 Висновки до розділу .....	24
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	26
2.1 Аналіз та вибір конструкції БПЕ для зарядки акумуляторів електричних транспортних засобів .....	26
2.1.1 Системи БПЕ .....	26
2.1.2 Аналіз та вибір моделей котушок БПЕ.....	27
2.1.3 Аналіз систем керування та контролю.....	31
2.1.4 Безпека людини при перебуванні біля БПЕ .....	34
2.2 Конструкція котушок системи БПЕ .....	35
2.3 Висновки до розділу .....	38

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ .....	39
3.1 Розрахунок електричних характеристик.....	39
3.2 Двонаправлена безпровідна передача енергії .....	42
3.3 Аналіз потужності, яка передається у системі ДБПЕ .....	43
3.4 Дослідження систем БПЕ з прямокутними котушками .....	47
3.5 Особливості системи керування .....	58
3.6 Алгоритм підвищення енергоефективності .....	59
3.7 Висновки до розділу .....	62
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	64
4.1 Можливість виникнення статичної електрики та заходи боротьби з нею.....	64
4.2 Фізичні основи електробезпеки .....	66
4.3 Надзвичайні ситуації природного характеру .....	67
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	70
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	71

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Бездротовий метод все більше набуває поширення для зарядки акумулятора електричних транспортних засобів. Стандартна технологія бездротової зарядки акумуляторів базується на основі індуктивної передачі енергії (БПЕ) між двома котушками. Одна підключена до електричної мережі, а інша підключена до акумуляторної батареї. БПЕ забезпечує переваги з точки зору безпеки та комфорту через відсутність операції з підключенням. Через БПЕ не виникає ризику ураження електричним струмом, вдається позбутися шнурів живлення, і процес зарядки акумулятора може запускатися автоматично.

Існує два типи БПЕ для бездротової зарядки: статичний БПЕ, коли транспортний засіб нерухомий і ніхто не знаходиться в ньому (наприклад, на парковці); динамічний або квазідинамічний БПЕ, коли автомобілем користуються (наприклад, під час руху або на червоному світлі світлофора). Бездротова передача живлення очевидно, є єдиним рішенням для динамічної зарядки, оскільки проводове підключення було б неможливим під час руху.

Незважаючи на незаперечні переваги, які приносить індуктивна передача потужності, дослідникам доводиться вирішувати кілька питань, щоб зробити цю технологію більш привабливою для ринку електромобілів.

Перш за все, система БПЕ за своєю суттю менш ефективна з точки зору передачі електроенергії у порівнянні зі звичайною системою на основі дроту. Дійсно, завдяки магнітній муфті між котушками, відбувається неминучий мінімальний витік магнітного поля, що призводить до втрати енергії. Крім того, необхідно враховувати деякі технічні аспекти при практичному впровадженні системи БПЕ: наприклад, для отримання максимального зв'язку, перекоси між котушками повинні бути якомога меншими. Що стосується безпеки, навіть якщо БПЕ дозволяє зменшити ризик ураження електричним струмом, необхідна певна обережність щодо впливу магнітного поля.

Окрім питань, пов'язаних із дизайном, мають бути й інші важливі міркування такі, як витрати, інфраструктурні наслідки, стандартизація та прийом замовлення.

Індуктивну муфту можна також використовувати для зворотного потоку потужності, тобто від транспортного засобу до електромережі. Автомобіль до електромережі Vehicle-to-grid(V2G) – широко поширена концепція, яка належить до сучасного уявлення про активний попит: у розумній електричній мережі, споживач може стати виробником енергії. Бездротова передача живлення може надавати підтримку V2G, і тому є двонаправленою індуктивною передачею потужності (ДБПЕ).

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи: підвищити ефективність, надійність та стійкість до взаємозміщень індуктивно-зв'язаних котушок системи передачі енергії у бездротовій зарядці електричного транспортного засобу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- при дослідженні безпроводної передачі енергії електричного транспортного засобу розглянути не складний випадок, а саме систему зарядки електровелосипед (E-bike).

- запропонувати систему БПЕ для бездротової зарядки акумулятора електричного велосипеда, і особливу увагу буде приділено магнітним та електричним колам.

- провести аналітичне дослідження типової двонаправленої системи БПЕ (ДБПЕ).

- запропонувати алгоритм керування для максимізації ефективності передачі потужності.

- дослідити альтернативні рішення індуктивного зв'язку відповідно до глибокого аналізу за допомогою 3D-магнітного симулятора.

**Об'єкт дослідження** – процеси взаємоперетворення електричної та магнітної енергії у системі безпроводної передачі енергії.

**Предмет дослідження** – зарядні пристрої електричних транспортних засобів.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

Отримано аналітичні вирази для розрахунку потужності, яка передається між індуктивно-зв'язаними котушками системи безпроводної передачі енергії.

**Практичне значення отриманих результатів.**

На основі проведених досліджень встановлено, що найменш чутливі до змін взаємного положення котушки побудованих за DD системою.

Впровадження результатів досліджень отриманих в результаті виконання даної роботи дозволить підвищити ефективність та стійкість до зміщень котушок безпроводної зарядки.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на ІХ Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2020 року. ТНТУ [1].

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань (51 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 77 сторінок, 6 таблиць, 41 рисунки.



## 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Бездротова зарядка для транспортних засобів малої потужності

#### 1.1.1 Бездротові сенсорні мережі

Бездротовий метод все більше набуває поширення для зарядки акумулятора транспортних засобів (ТЗ). Відсутність проводів бажана, коли силовий кабель незручний або навіть неможливий у використанні. Можна використовувати бездротову зарядку акумуляторів у різних ситуаціях, починаючи від наднизьких рівнів живлення датчиків бездротового зв'язку до надвисоких рівнів потужності залізнодорожних. Наприклад: електрична зубна щітка, мобільний телефон [2], ноутбук [3], електричний велосипед [4], електромобіль [5], електробус [6].

Зарядка бездротового акумулятора для пристроїв малої потужності коливається від приладів наднизької потужності, таких як бездротові датчики або пристрої для імплантації, до побутової електроніки, такої як смартфони чи ноутбуки. Пристрої наднизької потужності варіюються від мкВт до МВт рівня потужності, тоді як рівні побутової електроніки варіюються від кількох Вт (наприклад, мобільних телефонів) до десятків Вт (наприклад, ноутбуків).

У бездротових сенсорних мережах використання проводів для живлення взагалі неможливе, оскільки бездротові датчики монтується на об'єкті вимірювання, наприклад для збору метеорологічних даних або військового призначення. У цих ситуаціях бездротове рішення є найкращим варіантом для обох комунікації та електропостачання.

У [7–8] пропонується наступний спосіб зарядки бездротового акумулятора електромобіля. Останній їде по запланованому шляху всередині мережі та перезаряджає датчики через індуктивну передачу живлення. В [9] пропонується індуктивна ланка передачі електроенергії для живлення акумуляторів вузлів бездротових сенсорних мереж. Відстань між індуктивними котушками знаходиться в межах  $(1 \div 10)$  мм.

Використання збору енергії в навколишньому середовищі для живлення датчиків можна розглядати як форму бездротової зарядки акумуляторів. Так у [10] акумулятори і суперконденсатори вузлів датчиків відповідно заряджаються від радіохвиль та сонячною енергією. Бездротова передача живлення також зручна в біомедичних приладах для зарядки імплантаційних пристроїв.

### **1.1.2 Побутові електронні пристрої та побутова техніка**

Наступний діапазон рівнів потужності представлений побутовими електронними пристроями, такими як мобільні телефони та ноутбуки. Для цих пристроїв діапазон рівня потужності від декількох Вт до десятків Вт. Зарядка бездротового акумулятора для мобільних телефонів повністю комерціалізоване та стандартизована.

Ця бездротова зарядка базується на індуктивній передачі потужності (IPT) між двома з'єднаними котушками: одна з них розміщується всередині колодки і підключається до електричної мережі, інша розміщується всередині пристрою та підключається до електричного акумулятора. При розміщенні мобільного пристрою на колодці, процес зарядки автоматично починається через магнітну індукцію. Стандарт був розроблений Wireless Power Consortium з метою створення спільної платформи, яка сприяє сумісності між бездротовими станціями зарядки та мобільними пристроями. Більше 200 компаній приєдналися до Wireless Power Consortium.

Одна з найпривабливіших переваг, яку приносить бездротова зарядка акумулятора для побутової електроніки – це можливість одночасно заряджати різні пристрої через один і той самий килимок, як запропоновано на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Комерційний приклад бездротової багатозарядної станції

## 1.2 Бездротова зарядка для електромобілів

Якщо порівнювати з побутовими електронними пристроями, зарядка електромобілів відбувається зі значно більшими рівнями потужності, коливаючись від кількох сотень Вт (як у випадку з електровелосипедом) до декількох десятків кВт (як у випадку електробусів). Бездротова зарядка електромобілів ще далеко не повністю комерціалізована та стандартизована. Тим не менш, реалізуючись через бездротову передачу потужності (БПЕ) між двома зв'язаними котушками, це забезпечує переваги з точки зору безпеки та комфорту для всіх користувачів.

Електромобілі можна заряджати за допомогою БПЕ, використовуючи в основному три альтернативні варіанти [11]: статичну бездротову зарядку, квазидинамічну або динамічну бездротову зарядку. Статична БПЕ використовується для зарядки електричного ТЗ кожного разу, коли він нерухомий і ніхто не залишається всередині нього, наприклад, у випадку припаркованого автомобіля. У квазидинамічному БПЕ перезарядка відбувається, коли електромобіль нерухомий, але хтось знаходиться всередині

нього, наприклад, у випадку з таксі на світлофорних перехрестях або на автобусній зупинці. Динамічний БПЕ полягає у зарядці ТЗ під час його руху, наприклад, у випадку, коли автомобіль рухається по автодорозі або рухається колоною.

### 1.2.1 Бездротова передача потужності для електричного велосипеда

Бездротова зарядка електричних велосипедів заснована на БПЕ. Дослідники та комерційні оператори запропонували різні рішення, що стосуються розташування з'єднаних котушок. Для всіх запропонованих рішень електровелосипед повинен бути припаркований, щоб провести операцію зарядки. В [12] наводиться аналіз різних рішень для з'єднання. Всі вони складаються з магнітної муфти, виготовленої з передавача, схованого під землею, і приймача, встановленого всередині велосипедної стійки. Також розглядаються різні види стійок. Відстань між передавачем і приймачем магнітної муфти становить 2 см.

В [13] велосипедна котушка розміщена збоку переднього кошика, а котушка, підключена до сітки, встановлена поруч зі стіною, обидві у вертикальному положенні, як показано на рис.1.2. Операція бездротової зарядки відбувається на відстані 5 см між котушками.

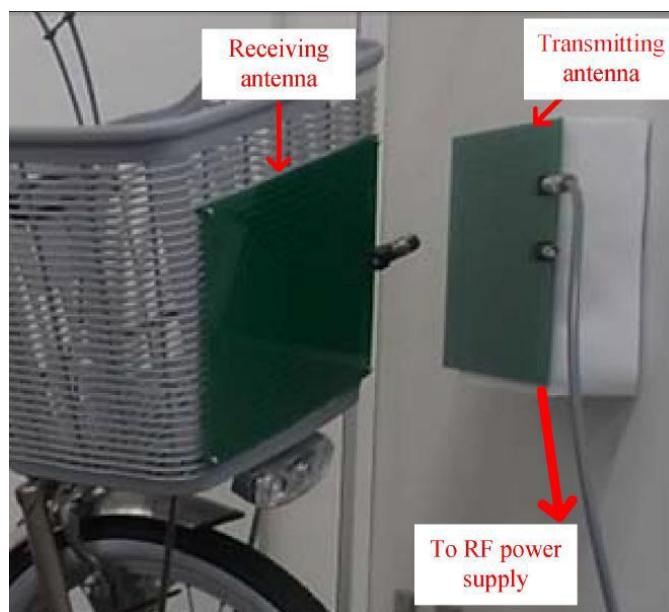


Рисунок 1.2 – Безпроводна зарядка електровелосипедів

Компанія SEW Eurodrive пропонує поставити котушку приймача всередину велосипедної підставки, як запропоновано на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Бездротова зарядка електричних велосипедів, запропонована SEW Eurodrive

### 1.2.2 БПЕ для електромобілів

Реалізована через БПЕ, бездротова зарядка для автомобілів водіям зручна. Що стосується безпеки та комфорту то водій не повинен турбуватися про шнури живлення, уникаючи ризику ураження електричним струмом, і може припаркувати автомобіль у відповідних місцях, де операція зарядки може автоматично початися. Котушки, як правило, розташовуються таким чином: одна, що підключена до мережі, розміщується на землі, а інша, що підключена до акумулятора, монтується в дно шасі автомобіля, як це зображено на рис. 1.4. Мінімальний рівень потужності для зарядки електромобілів, як правило, становить 3 кВт.

Можна навести різні приклади комерційних бездротових зарядних станцій для електрокарів, оскільки компанії EV все більше зацікавлені в цій інноваційній технології зарядки. Серед виробників автомобілів Toyota, Nissan,

General Motors і Ford – одні з компаній, що проявляють інтерес до індуктивного методу зарядки.

Серед компаній, що виробляють бездротові системи зарядки для електромереж, Еватран та HaloIPT є лідерами у просуванні та вдосконаленні технології індуктивної зарядки.

Еватран створив індуктивну систему зарядки Plugless Power. Зображення індуктивного зарядного пристрою для Qualcomm, показане на рис. 1.4].



Рисунок 1.4 – Бездротова зарядка для електричного автомобіля на основі БПЕ

Крім того, наукові дослідження все більше зосереджуються на дослідженні різних аспектів, пов'язаних із БПЕ для бездротової зарядки електромобілів, про які повідомляється в [5], [14] та інших наукових роботах. В реалістичному сценарії постійно зростаючого використання електромобілів одна з найцікавіших проблем є можливість "зарядки" на дорозі, тобто акумулятор можна заряджати під час користування автомобілем, як це зображено на рис. 1.5.

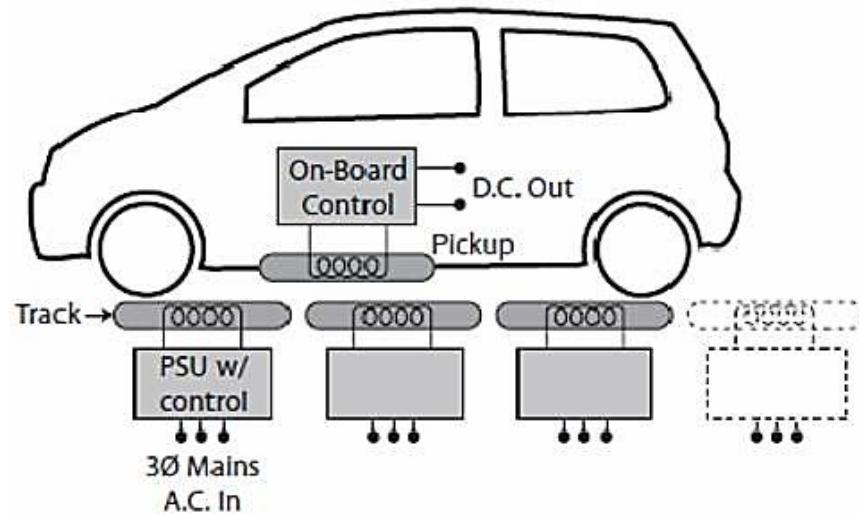


Рисунок 1.5 – Проїздна частина з БПЕ

Квазідинамічна та динамічна БПЕ являють собою актуальне рішення для збільшення шляху руху без зупинки на зарядку. У роботі [15] досліджується можливість індуктивного заряду під час руху транспортного засобу на автошляхах.

Як зображено на рис. 1.5, динамічна зарядка присутня всередині дороги. Вона складається з декількох котушок, що дозволяє передавати потужність до приймальної котушки, яка знаходиться всередині автомобіля, щоразу, коли під час руху приймальна котушка наближається до будь-якої з дорожніх котушок.

Індуктивне з'єднання між електричною мережею та електромобілем може також використовуватися для зворотної передачі енергії, тобто від транспортного засобу до електричної мережі " Vehicle-to-grid ".(V2G). V2G – це широко розповсюджена концепція, що належить до сучасного уявлення про активний попит: у розумній електричній мережі споживач може стати виробником енергії. У разі надлишку енергії, що зберігається в деяких пристроях мережі, енергія може надходити до інших пристроїв, що її потребують.

Бездротова передача енергії може представляти підтримку V2G, тому може бути двонаправленою бездротовою передачею енергії (ДБПЕ). Про декілька робіт повідомляється у науковій літературі щодо ДБПЕ [16–17].



### 1.2.3 БПЕ для електричних автобусів та залізнодорожного транспорту

Електричні автобуси та залізничний транспорт споживають надвисокі величини енергії, від десятків до сотень кВт. У [18] виконано детальний огляд бездротової передачі електроенергії для автобусів та залізничного транспорту. Он-лайн електромобіль – одна з найсучасніших систем для безпроводної зарядки електромобілів загалом і автобусів зокрема [19]. На рис. 1.6. виділена типова система бездротової зарядки електричного автобуса.

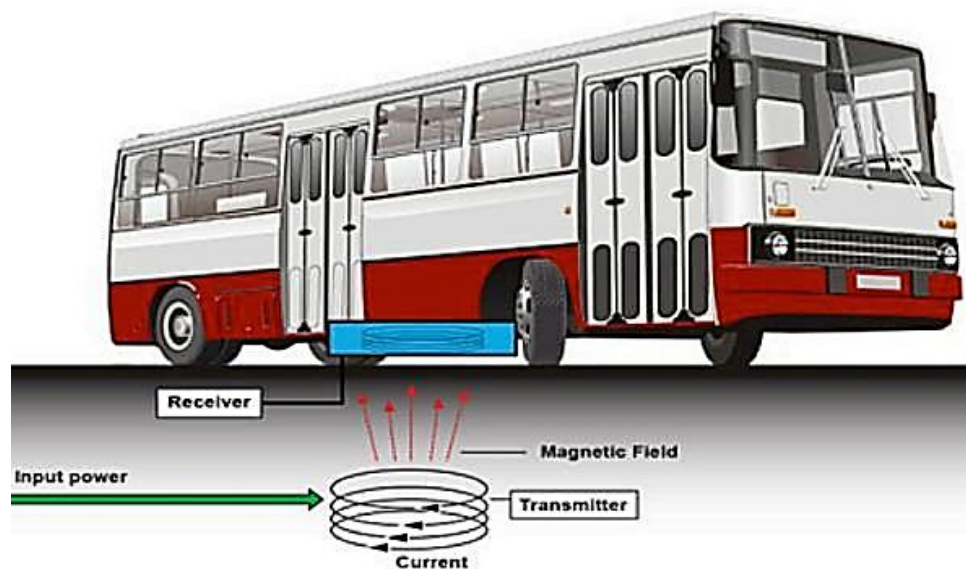


Рисунок 1.6 – Індуктивна передача електроенергії для зарядки електричного автобуса

В роботі [20] запропонована конструкція БПЕ, що застосовується до залізниць. У роботі [21] проведено дослідження, спрямоване на оптимізацію ефективності бездротового трамваю з низьким поверхом. У [22] автор пропонує вдосконалене технологічне рішення БПЕ для електричних автобусів, трамваїв та поїздів. Зображення трамваю показано на рис. 1.7.



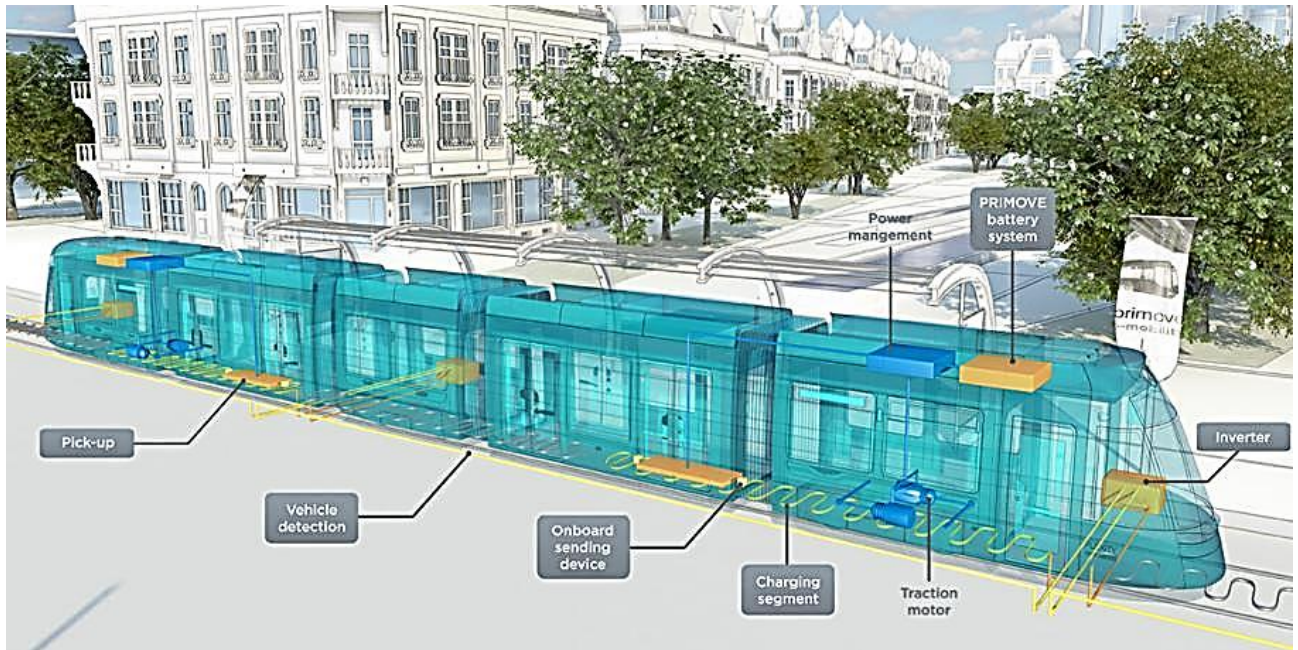


Рисунок 1.7 – Конструкція БПЕ для трамваю

### 1.3 БПЕ. Опис системи

На рис. 1.8 показана типова схема системи БПЕ. У цій схемі зарядки акумуляторів електрична енергія джерела постійного струму спрямовується до акумулятора.

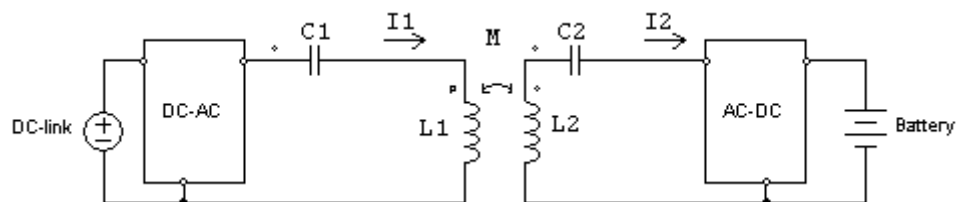


Рисунок 1.8 – Типова схема системи БПЕ

БПЕ відбувається між двома магнітно пов'язаними котушками. Їх самоіндуктивність –  $L1$  і  $L2$ ; взаємна індуктивність  $M$ .  $L1$  і  $L2$  відповідають відповідно первинній і вторинній котушці. Первинне джерело напруги постійного струму (ліва сторона схеми) підключене до електричної мережі; права сторона схеми – це навантаження, що представляє собою акумулятор, який потрібно зарядити. Оскільки передача електроенергії через з'єднані котушки здійснюється на змінному струмі, потрібні два проміжні етапи: DC-AC

перетворювач на стороні джерела енергії та AC-DC перетворювач на стороні акумулятора.

Оскільки між котушками зв'язок слабкий то потрібно використати реактивну ланку щоб підвищити максимальну ефективність передачі енергії та оптимізацію коефіцієнта потужності, якщо система працює на резонансі. Ця реактивна ланка має назву компенсаційної ланки і включає два конденсатори, по одному для кожної сторони. У прикладі рисунка обидва компенсаційні конденсатори C1 і C2 з'єднані послідовно з первинною і вторинною котушками. Основні частини систем БПЕ будуть описані нижче.

### 1.3.1 Компенсаційна ланка

Реактивна мережа потрібна для того, щоб досягти максимальної ефективності передачі потужності навантаження та коефіцієнта потужності до джерела. Оскільки реактивні елементи, які потребують компенсації, є сполученими індукторами, компенсаційними елементами є конденсатори. Згідно з рис. 1.9 конденсатор, підключений до первинної котушки є первинним конденсатором C1, тоді як конденсатор, з'єднаний з вторинною котушкою, є вторинним конденсатором C2.

За типом зв'язку між котушками та їх компенсаційними конденсаторами можливі чотири різні компенсаційні топології: послідовно-послідовна (SS), послідовно-паралельна (SP), паралельно-рядна (PS) і паралельно-паралельна (PP). У кожному з цих чотирьох рішень перше слово (літера) стосується первинної сторони, тоді як друге слово (літера) позначає другорядну сторону, як підкреслено на рис. 1.9. Вибір конкретної топології, а не іншої, залежить від конкретного застосування.

Вибір SS дозволяє вибирати компенсаційні ємності залежно лише від самоіндуктивності, незалежно від того, яке навантаження та магнітну муфту. Тому, у разі невідповідностей між котушкою, система продовжує працювати в резонансі, незважаючи на взаємні коливання індуктивності.

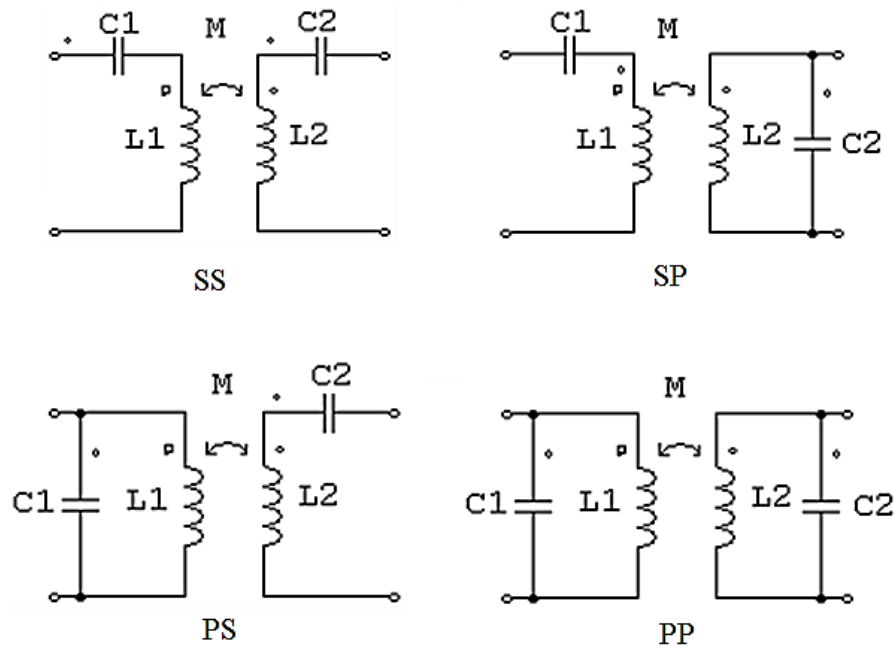


Рисунок 1.9 – Чотири основні топології компенсації

З цих причин топологія SS виявляється зручною для зарядки батареї EV. Дійсно, при зарядці автомобілів БПЕ ідеальне вирівнювання котушок є ідеальним випадком, і навіть невеликі нерівності неминучі.

### 1.3.2 Перетворювачі потужності

Джерелом живлення у БПЕ є електрична мережа, тоді як навантаження – акумуляторна батарея. Потрібні два перетворювачі потужності, один у первинному, а другий у вторинному колі. У первинному колі зазвичай використовується подвійна ступінь перетворення, що виникає в результаті каскаду змінного струму і постійного струму (цей постійний струм змінного струму є виділеним на рис. 1.8). Мета цього подвійного перетворення – збільшити частоту мережі напруги живлення з 50 Гц (або 60 Гц) до десятків кГц. На вторинному колі стороні необхідно перетворити змінний струм на постійний для зарядки акумулятора постійного струму. Оскільки схема перетворення з змінного на постійний струм у первинному колі є стандартною та достатньо вивченою, то наукові дослідження, як правило, зосереджуються на дослідженні процесів перетворення постійного струму на змінний високої

частоти у первинному колі, передачі енергії між котушками та перетворення високочастотного змінного струму в постійний.

Досліджено різні схемотехнічні рішення, які здійснюють перетворення у первинному колі. Щодо вторинного кола, то для перетворення змінного струму високої частоти у постійний для зарядки акумулятор в основному використовують два варіанти: або пасивний випрямляч плюс перетворювач DC-DC постійного струму, або активний випрямляч та AC-DC перетворювач..

### 1.3.2.1 Перетворення DC-AC в первинному колі

DC-AC перетворення в первинному колі живиться від кола постійного струму і генерує змінний струм заданої частоти, який протікаючи у первинній котушці наводить струм у вторинній котушці, як показано на рис. 1.8. У БПЕ, що використовується у електромобілях, частота напруги живлення становить кілька десятків кГц. Можливі два альтернативні схемотехнічні рішення для реалізації стадії DC-AC: напівмостова та повномостова схема.

Схема напівмоста показана на рис. 1.10. Утворена прямокутна форма хвилі  $V_1$  коливається від  $(-V_{dc} / 2)$  до  $(V_{dc} / 2)$ , де  $V_{dc}$  – напруга живлення постійного струму. Робочий цикл  $V_1$  відповідає робочому циклу сигналу, що управляє двома MOSFET ключами.

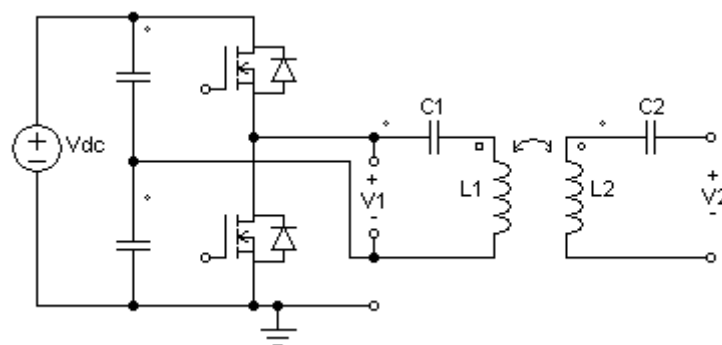


Рисунок 1.10 – Напівмостовий DC-AC перетворювач в первинному колі

Повномостова схема показана на рис. 1.11. Повномостова схема генерує сигнал хвилі змінного струму.  $V_1$  коливається від  $-V_{dc}$  до  $V_{dc}$ , Прямокутна

хвиля  $V_1$ , яка генерується напівмостовою схемою, несе на 50 % менше енергії ніж повномостова. Тому, щоб отримати ту саму потужність, струм у повномостовому колі може бути наполовину меншим від півмостового.

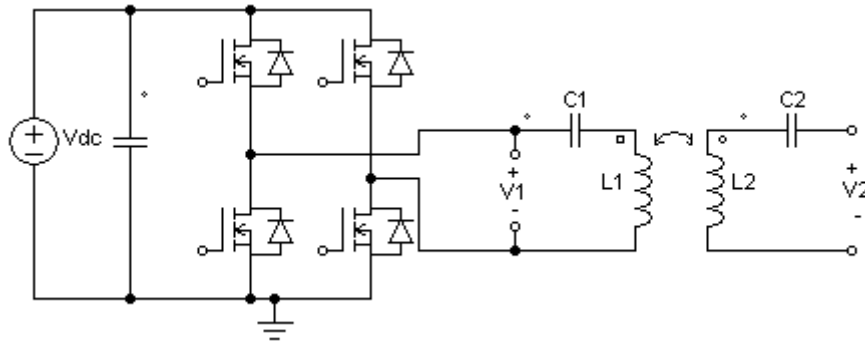


Рисунок 1.11 – Мостовий DC-AC перетворювач в первинному колі

Значно складніше керувати чотирма активними елементами у повномостовій схемі ніж двома у напівмостовій. Тут потрібна синхронізація чотирьох MOSFET ключів. Потік енергії в повномостовій схемі може бути чітко відрегульованим з використанням модулювання фазового зсуву.

### 1.3.2.2 AC-DC перетворювач у вторинному колі

У вторинному колі необхідно використати AC-DC перетворювач для перетворення змінної напруги, яка наводиться у вторинній котушці, в постійну напругу, необхідну для зарядки акумулятора. Відповідно до питань ефективності та керованості, для AC-DC перетворювача можна використовувати два альтернативні рішення: пасивний випрямляч або активний випрямляч.

Пасивний випрямляч, як правило, складається із звичайного чотиридіодного моста, який просто випрямляє змінний струм, що надходить від магнітно зв'язаних котушок. Отриману постійну напругу необхідно зменшити до величини, достатньої для зарядки акумуляторної батареї. Отже, між пасивним випрямлячем та акумулятором необхідний проміжний каскад. DC-DC

перетворювача, щоб напругу та струм зарядки можна було належним чином контролювати. Схема вторинного кола показана на рис. 1.12.

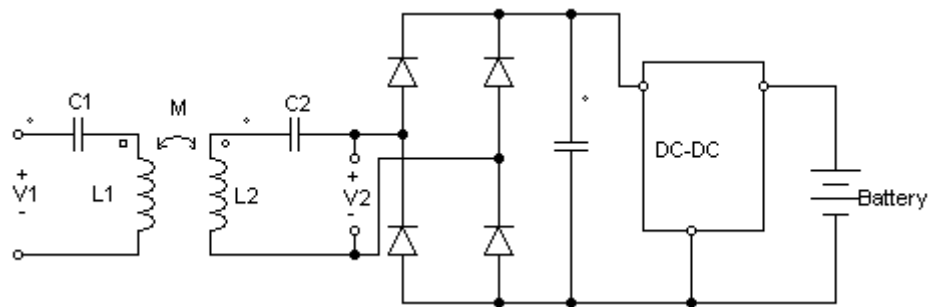


Рисунок 1.12 – Пасивний випрямляч і DC-DC перетворювач у вторинному колі

Якщо використати активний випрямляч, то відпадає необхідність у DC-DC перетворювачі. Використання звичайного пасивного випрямляча на каскаді змінного струму не є зручним з точки зору ефективності та керованості. Що стосується ефективності, то використання активних елементів є зручним, враховуючи наднизький опір силових МОП-транзисторів. Що стосується керованості, активний випрямляч дає можливість безпосередньо контролювати струм зарядки акумулятора, не вимагаючи додаткового перетворювача постійного струму для живлення батареї.

На рис. 1.13 показано активний випрямляч 2-діод-2-MOS. Контролюючи різницю фаз між сигналами, що подаються на MOSFET, можна регулювати кількість енергії, що надходить до батареї [23].

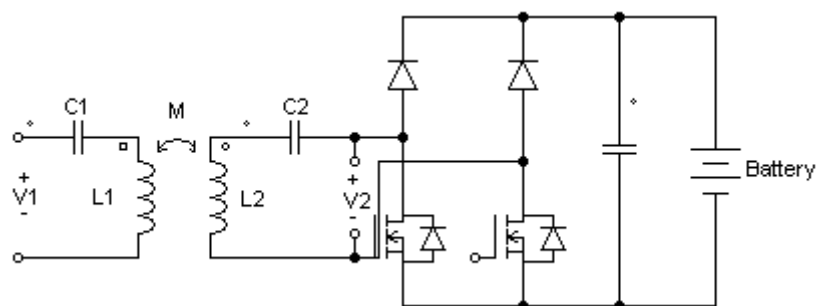


Рисунок 1.13 – Активний випрямляч 2-діод-2-MOS у вторинному колі

Якщо використовується повністю активний каскад, як показано на рис. 1.14, то можна забезпечити можливість двонаправленої передачі енергії [24].

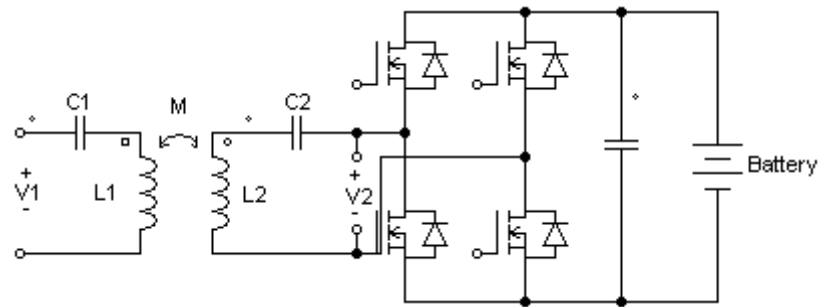


Рисунок 1.14 – Повномостовий AC-DC на вторинній стороні

### 1.3.3 Акумулятор

В даний час літій-іонні батареї представляють найпоширенішу типологію батарей завдяки високій густині енергії та тривалому часу служби. Літій-іонні акумулятори добре підходять для кількох застосувань: портативна електроніка, електромобілі, космічні та авіаційні системи живлення, стаціонарні накопичувачі енергії.

Серед літій-іонних батарей саме LiFePO<sub>4</sub> набувають все більшого поширення на ринку, особливо для електромобілів. Акумулятори LiFePO<sub>4</sub> відрізняються високою ємністю та хорошою стабільністю за хімічними та термічними характеристиками.

Для оптимізації використання акумуляторів часто потрібна детальна модель батареї. У роботах [25] та [26] наведена повна динамічна модель літій-іонних батарей, яка включає нелінійні потенціали рівноваги, температурні залежності, теплові ефекти та реакцію на перехідні режими. Модель, перевірена через експериментальні випробування, та може бути використана для оптимізації роботи акумулятора. У роботі [27] запропонована динамічна модель акумулятора LiFePO<sub>4</sub>, з особливим урахуванням ефектів нелінійної ємності.

Для належного керування системою зарядки акумулятора необхідне точне знання поточного стану заряду акумулятора. У роботах [28] та [29] автори пропонують алгоритм оцінки поточного стану заряду відповідно до

нелінійної залежності між станом заряду та напругою розімкнутого контуру акумулятора.

Типова характеристика заряду літій-іонної батареї показана на рис. 1.15 [25]. В основному існує два режими зарядки: режим постійного струму та режим постійної напруги. У режимі постійного струму струм підтримується на фіксованому значенні, тоді як напруга зростає до максимального значення; потім починається режим постійної напруги, і напруга підтримується на максимальному значенні, тоді як струм падає до нуля.

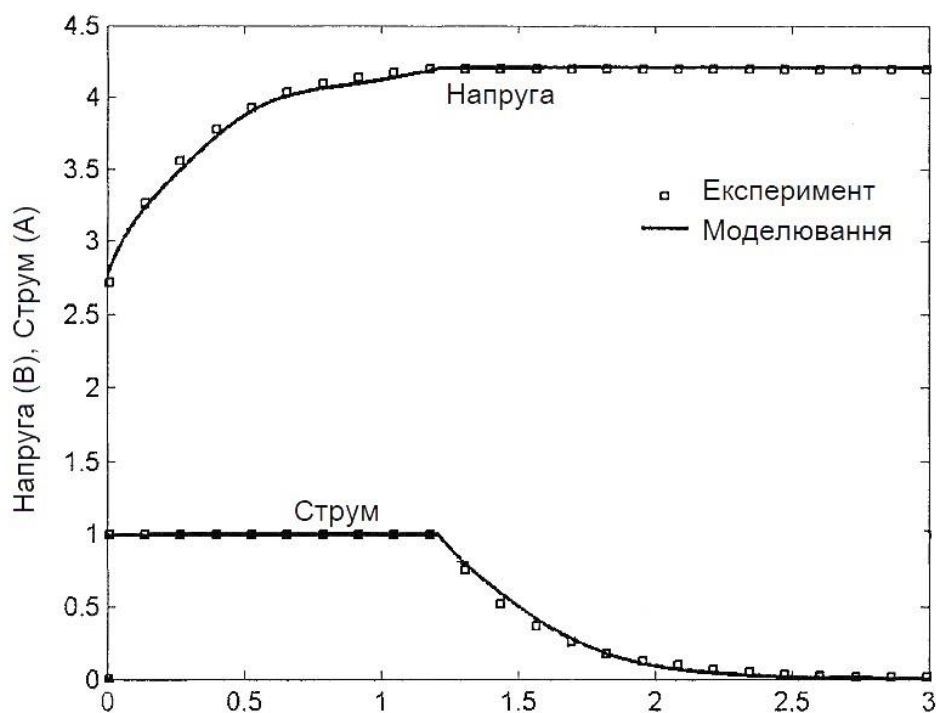


Рисунок 1.15 – Типові характеристики зарядки літій-іонного елемента [25]

#### 1.4 Висновки до розділу

Проведено аналіз основних складових бездротової зарядки для акумулятора, враховуючи рівні потужності, що варіюються від мкВт у бездротових сенсорних мережах до сотень кВт у залізничному транспорті. Особливу увагу приділено електричним та магнітним колам індуктивних



системами передачі енергії. Надано загальний огляд та стан техніки щодо БПЕ, що застосовується у електричних транспортних засобах, з урахуванням магнітних муфт, методологій проектування, стратегій керування та питань безпеки.

У результаті сформульовано наступні завдання:

– при дослідженні безпроводної передачі енергії електричного транспортного засобу розглянути не складний випадок, а саме систему зарядки електровелосипеда (E-bike).

– запропонувати систему БПЕ для бездротової зарядки акумулятора електричного велосипеда, і особливу увагу приділити магнітним та електричним колам.

– провести аналітичне дослідження типової двонаправленої системи БПЕ (ДБПЕ).

– запропонувати алгоритм керування для максимізації ефективності передачі потужності.

– дослідити альтернативні рішення індуктивного зв'язку відповідно до глибокого аналізу за допомогою 3D-магнітного симулятора.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Аналіз та вибір конструкції БПЕ для зарядки акумуляторів електричних транспортних засобів

#### 2.1.1 Системи БПЕ

Конструкція безпроводної системи передачі енергії, що застосовується у електричних транспортних засобах, є досить складною, оскільки необхідно враховувати декілька аспектів. По-перше, система БПЕ складається з різних електричних підсистем, що вимагають належного проектування та керування: при проектуванні магнітної муфти певна увага повинна бути спрямована на ефективність зчеплення, можливі розбіжності у конструкції котушок, їх вагою та об'ємом; для регулювання величини та напрямку потоку потужності каскади силової електроніки повинні бути належним чином контрольовані. По-друге, наслідки встановлення та роботи системи БПЕ різноманітні: додаткові витрати, інфраструктурні роботи, задоволеність споживачів, вплив магнітного поля та інші питання вимагають ретельних досліджень.

Для оптимального проектування слід глибоко зрозуміти принципи роботи різних типів та схем систем БПЕ, незалежно від застосувань та рівнів потужності. Наукова література зосереджена, зокрема, на умовах максимальної ефективності. Оскільки ефективність передачі потужності є важливим показником якості для системи БПЕ.

У роботі [30] проводиться дослідження максимізації ефективності шляхом регулювання різних параметрів, таких як частота та взаємна індуктивність. Також проведено дослідження взаємозв'язку між оптимальним повітряним зазором та геометрією котушки.

У [31] запропоновано метод оптимізації ефективності послідовно підключеного резонансного перетворювача для безконтактних систем передачі потужності.

Зв'язок між вхідним опором та максимально переданою потужністю проаналізовано в [32] з експериментальним підтвердженням на двошарових квадратних котушках.

У роботі [21] умови для оптимізації ефективності оцінюються в послідовно-послідовних та послідовно-паралельних компенсаційних схемах.

Проблема узгодження імпедансу для систем БПЕ досліджена в [33].

Феномен біфуркації проаналізовано в [34]. Слід запровадити регулятор, орієнтований на нульовий фазовий кут між вхідною напругою та струмом, щоб мінімізувати втрати потужності. Детальний аналіз проводиться щодо всіх можливих схем реактивної компенсації.

У деяких випадках, наприклад у залізнодорожних ТЗ, максимальна передача потужності є більш значною, ніж максимальна ефективність. У роботі [35] отримано оптимальну робочу частоту для передачі потужності: ця частота відрізняється від резонансної частоти, що відповідає максимальній ефективності.

### **2.1.2 Аналіз та вибір моделей котушок БПЕ**

Для того, щоб оцінити магнітне зчеплення та ефективність у літературі досліджується декілька конструкцій БПЕ для потужних автомобільних зарядних пристроїв. У більшості досліджених схем використовують ферит для підвищення ефективності перетворення енергії. Ферит не використовують у низько потужних зарядних пристроях. Зазвичай виникає компроміс між ефективністю зчеплення та вагою. Ефективність зчеплення в основному залежить від конструкції котушок передавача та приймача. З метою використання у БПЕ досліджуються інноваційні геометрії котушок та основні конструктивні особливості, що дозволять зменшити залежність ефективності перетворення потужності від розбіжностей у конструкції котушок.

У роботах [36] та [37] описана та досліджена кругла плоска котушка з феритовим осердям для передачі потужності у 2 кВт. Застосовано дві однакові

силові котушки. Феритові осердя розміщені в радіальному розташуванні (рис. 2.1). Феритовий диск нарізаний брусками для зменшення загальної ваги. Головним недоліком є відсутність стійкості проти зміщення в поперечному напрямку через значне зменшення коефіцієнта магнітного зчеплення.

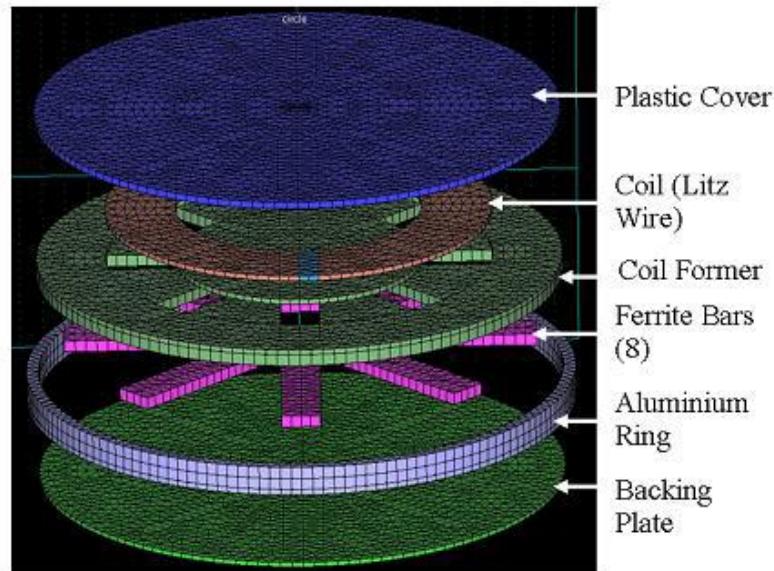


Рисунок 2.1 – Структура котушки із феритовими пластинами [95]

У роботі [37] пропонується так звана магнітна структура «FluxPipe», що складається з прямокутного плоского феритового осердя для кожної силової обмотки (рис. 2.2). Обмотка котушки навита навколо осердя. Тому обмотка «двостороння». Ця конструкція відрізняється більш компактними розмірами та вищими характеристиками, ніж площинна, завдяки вищій стійкості до двобічних зсувів.



Рисунок 2.2 – Котушки «FluxPipe»

Для вихідної потужності 1,5 кВт і повітряного зазору 7 см максимальна ефективність зчеплення становить 95 %.

Для зменшення ваги всієї конструкції авторами [38] запропонована своя модифікація прямокутної форми котушок. Використано збірний феритовий сердечник "Н-подібної форми". Ця конструкція (рис. 2.3) має майже однакову ефективність зчеплення в порівнянні з "FluxPipe", і менш чутлива до зміщення котушок. Тому для електричних ТЗ Н-подібна структура є кращим компромісом між вагою, компактністю, чутливістю до поперечного зміщення та ефективністю.

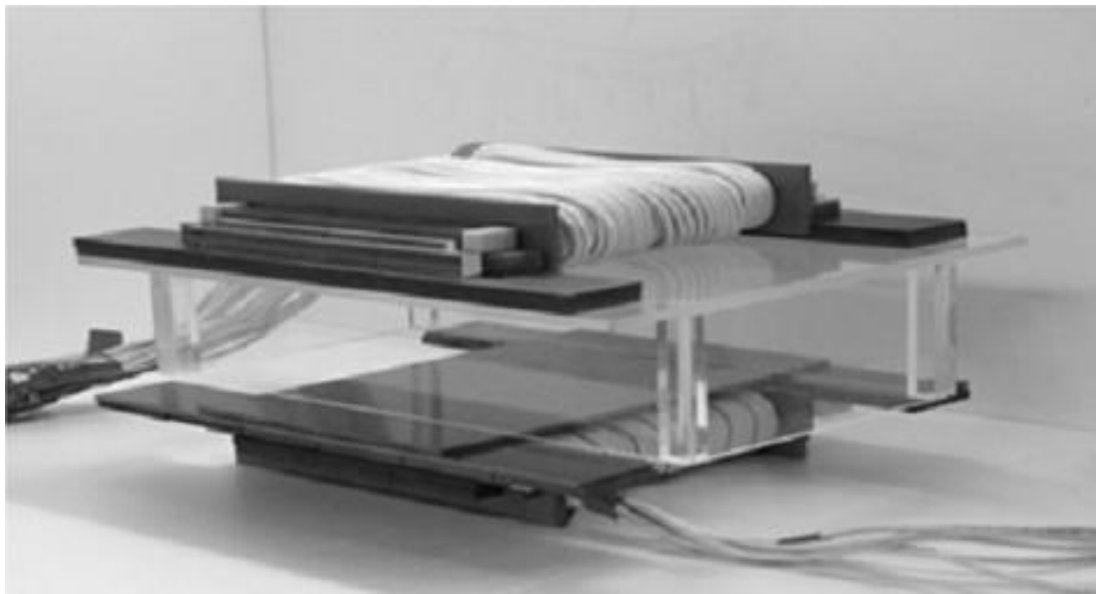


Рисунок 2.3 – Фотографія структури Н-форми

В даний час найбільш ефективною формою котушок для БПЕ, що застосовуються до бездротової зарядки ТЗ, є «подвійне кільце» "Double D" (DD), описана в [39]. На рис. 2.4 показана модель DD.

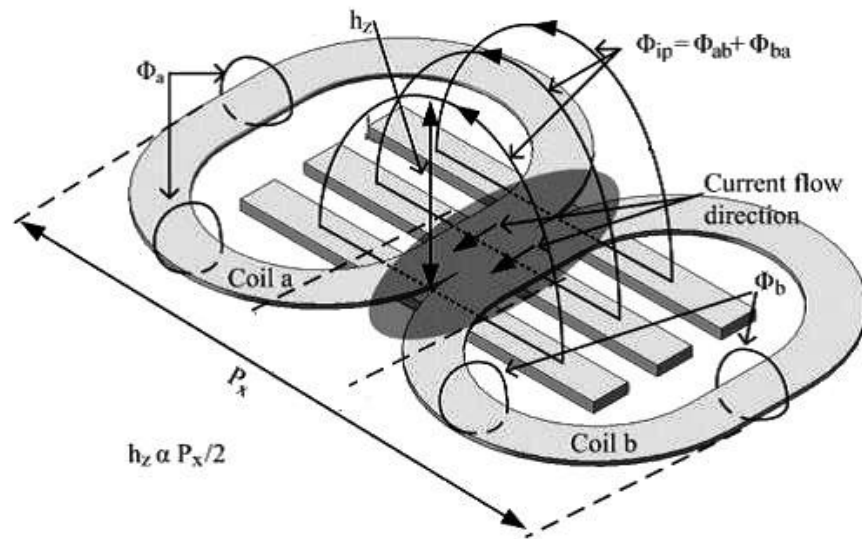


Рисунок 2.4 – Модель котушок DD

У роботі [40] пропонується варіант конструкції без серцевини, що складається з двох круглих котушок для бездротової зарядки електромобілів. Наведено результати дослідження оптимального розміру обох котушок, а також встановлено найкращу компенсацію – паралельну. Точна модель будується шляхом отримання значень взаємної індуктивності, що відповідає різним розглянутим розмірам і підтримує постійну довжину повітряного зазору та вагу конструкції. Максимальна ефективність – 85% при 20 см повітряного зазору.

Через значну кількість конструктивних параметрів при оцінці належної структури магнітного зв'язку, необхідно систематизувати методики проектування магнітного кола. У роботі [24] запропоновано методологію проектування магнітних муфт для систем БПЕ, яка використовується у побутових електроприладів та в електромобілях. Розглядаються декілька аспектів, таких як чутливість до взаємного розташування котушок та товщини повітряного зазору. За допомогою феритових осердь досягається 90 % ефективності при 1 см повітряного зазору та при рівні потужності 1 кВт. У роботі [41] запропоновано метод проектування магнітної муфти без осердя з прямокутними котушками. Тут вдалося досягнути коефіцієнту корисної дії

82 % для 15 см повітряного зазору між котушками, та передачі потужності 2 кВт.

### 2.1.3 Аналіз систем керування та контролю

У літературі пропонується кілька способів курування для належного регулювання динамічної реакції системи БПЕ та величини потоку потужності. У випадку двонаправлених систем також потрібно регулювати напрямок потоку потужності. Загальне дослідження стабільності та керування системами БПЕ для розширеного діапазону рівнів потужності (до 150 кВт) проводиться в [42]. У роботі [18] передбачений динамічний алгоритм керування для системи двонаправлених систем. У [43] в основному порівнюються три методи курування: курування фазовим зсувом, регулювання частоти та подвійне курування. Регулювання напруги не розглядається через необхідність використовувати DC-DC перетворювача у вторинному колі. Подвійне курування, що полягає у поєднанні фазового зсуву та регулювання частоти, є найбільш зручним з точки зору ефективності, навантаження на електронні компоненти та керованості.

У [44] порівнюються чотири методи керування: регулювання напруги, регулювання частоти, контроль робочого циклу та контроль фазового зсуву. Регулювання напруги не є зручним через необхідність використовувати DC-DC перетворювача. Серед інших методів керування найбільше ефективним є керування фазовим зсувом. Це доведено як на основі математичного та імітаційного моделювання, так і експериментальними випробуваннями. Це зручно, якщо стосується витрат та стабільності. Крім того, він відповідає стандарту Qi Wireless Power Consortium що використовується у пристроях малої потужності.

Альтернативним і надійним методом керування є метод регулювання частоти живлення. Взаємозв'язок між робочою частотою та переданою потужністю використовується для регулювання та обмеження величини та

напрямку потоку потужності, навіть якщо для того, щоб гарантувати максимальну ефективність, систему слід утримувати на резонансному рівні частоти. Ефективність цього методу керування підтверджена на прототипі системи VDIPТ потужністю 2 кВт.

Широко розповсюдженим методом керування, що застосовується до систем БПЕ, зокрема для зарядки електромобілів та двонаправленої передачі потужності, є керування фазовим зсувом. Контроль фазового зсуву полягає в регулюванні величини та напрямку потоку потужності за допомогою деяких параметрів керування, що відповідають фазовим кутам. Фазовий зсув між основними гармоніками первинної та вторинної напруг підтримується на рівні  $90^\circ$ , щоб отримати максимальний коефіцієнт потужності та максимальну ефективність.

Відповідно до знака фази, незалежно від того, чи фазовий кут дорівнює  $+90^\circ$  або  $-90^\circ$ , напрямок потоку потужностей різний. Це означає, що потужність спрямована від мережі до батареї або від батареї до мережі. Натомість величина потоку потужності регулюється за допомогою контролю фазового кута між ніжками кожного перетворювача потужності. На рис. 2.5 показана типова блок-схема методу керування фазовим зсувом:  $\alpha$  – фактичний фазовий зсув.

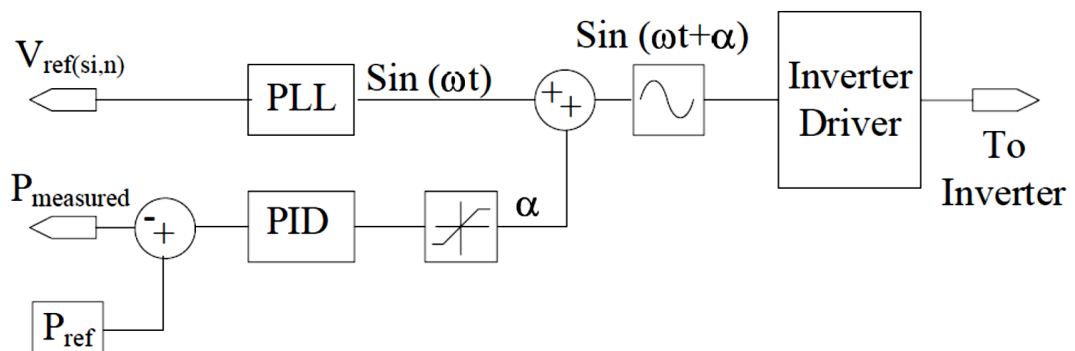


Рисунок 2.5 – Спрощений метод керування фазовим зсувом



У роботі [45] керування фазовим зсувом застосовується до системи БПЕ без компенсаційної мережі у вторинному колі, так що порушення настройки цієї сторони мало ймовірно.

Регулювання фазового зсуву використовується для керування потоком потужності до акумулятора прототипу електромобіля потужністю 3 кВт, зарядженого через БПЕ. Запропонована топологія не використовується для ДБПЕ. Двонаправлене регулювання потужності дозволяє підвищити ефективність та стійкість компонентів по відношенню до одностороннього керування, особливо в умовах часткового навантаження. Надано точні міркування щодо робочої частоти, режиму жорсткого перемикавання та плавного перемикавання, технології силових компонентів, конструкції магнітної системи та стану системи для різних повітряних зазорів. Для ділянки від джерела постійного струму до акумулятора пікова ефективність становить 95,8 % при мінімальному повітряному зазорі 10 см.

#### **2.1.4 Безпека людини при перебуванні біля БПЕ**

Аналіз та конструкція бездротових зарядних пристроїв на базі БПЕ передбачає турботу про безпеку людини. Слід враховувати три основні джерела небезпеки: ураження електричним струмом, небезпека пожежі та вплив електромагнітного поля.

Небезпека ураження електричним струмом та пожежі обумовлена високими напругами та струмами в первинних та вторинних котушках, особливо у системах з високим рівнем потужності. Щоб запобігти виникненню цих випадків, слід дотримуватися звичайної обережності та правил техніки безпеки.

Вплив електромагнітного поля (ЕМП) є основною проблемою для бездротової зарядки, особливо у випадку бездротової зарядки електромобілів. В системах БПЕ робочі частоти, як правило, дорівнюють десяткам кГц, так що зона випромінювання – це довгохвильове електромагнітне поле, а точніше

магнітне поле. Тому випромінювання, що генерується бездротовими зарядними пристроями, вважається цілком безпечним для людського організму.

Тим не менше, якщо рівні потужності високі, вплив ЕМП слід враховувати для ретельного розгляду наслідків для безпеки. Це причина, чому вплив магнітного поля є основною проблемою для бездротової зарядки електромобілів БПЕ, де слід провести точне дослідження розподілу поля. Беручи до уваги типовий випадок бездротової зарядки електричного автомобіля, для людей, що перебувають у транспортному засобі, не існує великої небезпеки від випромінювання через металевий екран, яким є шасі. Найнебезпечніші зони випромінювання знаходяться між котушками та навколо котушок. Однак ці зони не завжди безпосередньо впливають на людей або тварин. Незважаючи на більшу відстань від джерела магнітного поля, ще однією небезпечною зоною, яка потребує розгляду, є територія навколо автомобіля, оскільки вона безпосередньо відкрита широкому загалу.

В основному існують дві міжнародні групи, які встановлюють стандарти та керівні принципи щодо впливу на людину електромагнітних полів: International Committee on Electromagnetic Safety (ICES) та International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Ці стандарти стосуються широкого загалу населення та населення, яке зазнає професійної діяльності.

У науковій літературі представлено мало результатів моделювання та експериментів щодо випромінювання, що виробляється бездротовими зарядними пристроями на основі БПЕ. У роботі [46] магнітний приймально-передавальний пристрій досліджується на предмет відповідності межам впливу ICNIRP. Особливе поєднання циліндричної форми та феритового осердя забезпечує менше розсіювання магнітного поля, так що густина потоку різко зменшується поза зарядним пристроєм. Проте експериментальні результати щодо випромінювання в цій роботі не наводяться. Крім прямого впливу на тіло людини, іноді може відбуватися і непрямий вплив. Прикладами потенційного непрямого впливу є вплив електромагнітного випромінювання на медичні

імпланти або фізичний контакт тіла з предметами, які сильно піддаються дії магнітного поля.

## 2.2 Конструкція котушок системи БПЕ

На рис. 2.6 показана функціональна схема запропонованої системи БПЕ для бездротової зарядки акумулятора ТЗ. Тут  $L1$  та  $L2$  – індуктивності першої та другої котушок,  $M$  – взаємоіндукція. Джерело постійної напруги у первинному колі підключено до електричної мережі; навантаженням постійного струму у вторинному колі є акумулятор.

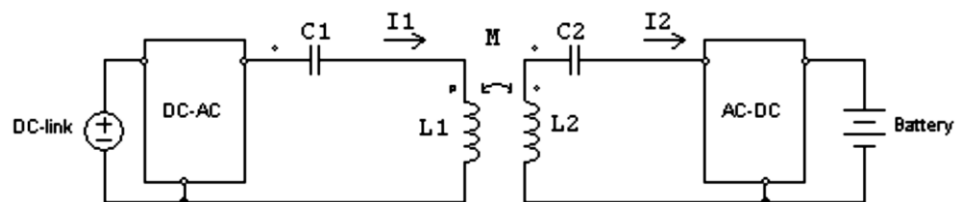


Рисунок 2.6 – Функціональна схема запропонованої системи БПЕ

У схемі застосуємо послідовно-послідовну ємнісну компенсацію (див. п.1.3.1). Як показано на рис. 2.6, конденсатори  $C1$  і  $C2$  з'єднані послідовно з відповідними котушками. Таке схемотехнічне рішення дозволяє вибрати компенсаційні ємності лише залежно від само індуктивності, тобто незалежно від навантаження та магнітного зв'язку. Крім того вибір послідовно-послідовної ємнісної компенсації дозволяє легко керувати режимами зарядки акумулятора.

Для зарядки акумулятора електричного автомобіля БПЕ зазвичай складається з котушки передавача, розміщеної на дорозі, та приймальної котушки, розміщеної в нижній частині шасі.

Що стосується зарядки акумулятора БПЕ електровелосипеда, то у запропонованій системі бездротової зарядки акумулятора передбачене положення котушки приймача знаходиться на передньому колесі велосипеда, паралельно їй. Поки велосипед стоїть на місці для паркування, переднє колесо має бути закріплене на опорі. Передавач потужності міститься всередині цієї

опори. Тому компактна конструкція магнітної системи добре підходить для цього способу монтажу.

При розробці системи БПЕ електровелосипеда не використовується феромагнітний матеріал, щоб отримати легку, компактну та дешеву конструкцію.

В системах БПЕ для зарядки акумуляторів електротранспорту на даний час використовують велику котушку передавача та меншу котушку приймача. Зменшений розмір котушки приймача, як правило, обумовлений обмеженням простору в такій рухомій системі, як транспортний засіб. Більший розмір котушки передавача дозволяє виробляти велику кількість енергії, створюючи тим самим більш однорідне магнітне поле в області приймача. Проте нами обрано однакові конструкції обмоток первинної та вторинної котушок, щоб мінімізувати розсіювання магнітного поля. Крім того, завдяки своїй геометричній симетрії, ця конструкція дає можливість двонаправленої передачі потужності. У двонаправленій системі БПЕ (ДБПЕ) потужність може надходити не тільки від електромережі до батареї, а й у зворотному напрямку.

У ДБПЕ роль передавача потужності або приймача енергії можуть виконувати обидві котушки. При зарядці акумулятора від мережі первинна котушка є передавачем, а вторинна котушка – приймачем. У випадку надлишку енергії у акумуляторі ТЗ вона передається у мережу. Тоді вторинна котушка є передавачем, а первинна котушка – приймачем. Взаємозамінність передавача потужності та приймача потужності гарантується реверсивними каскадами DC-AC та AC-DC перетворювачів.

Діаметр кожної котушки був обраний відповідно до просторових обмежень на колесі електричного велосипеда. Кількість витків кожної котушки вибрана як компромісний варіант між такими факторами: коефіцієнт індуктивного зв'язку, втрата потужності у міді, поверхневий ефект, явища біфуркації. Цей компромісний варіант описано в [47].

Кожна котушка має зовнішній діаметр 15 см і 9 витків мідного дроту діаметром 3 мм. Враховуючи проміжок 3,5 мм між центрами дрових ділянок

двох послідовних витків, виходить внутрішній діаметр 8,8 см. Для перевірки ефективності зчеплення розробленої системи БПЕ вибрано максимальний повітряний зазор між паралельними обмотками 3 см. На рис. 2.7 показана тривимірна модель запропонованої системи із двох котушок індуктивності.

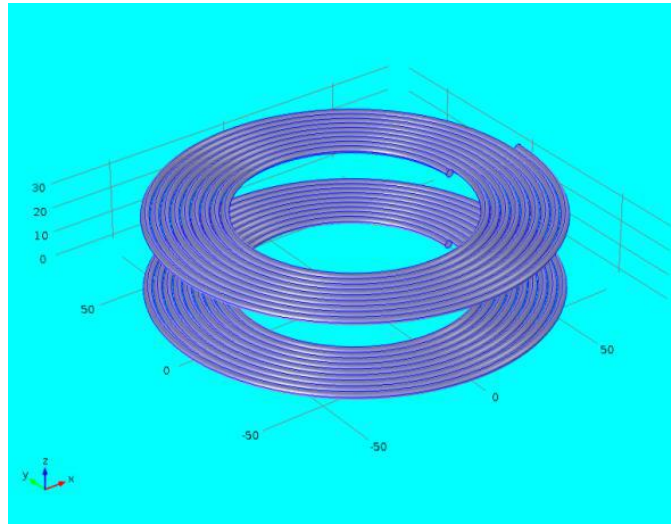


Рисунок 2.7 – 3D-модель плоских круглих котушок індуктивності

Конструкційні особливості запропонованої системи із двох котушок індуктивності, що стосуються матеріалу та геометрії, зведені в табл. 2.1 ( $\rho_{Cu}$  та  $\mu_{Cu}$  – та відносна магнітна проникність міді;  $d$  – діаметр ділянки дроту;  $l$  – загальна довжина дроту кожної котушки;  $d_{out}$  – зовнішній діаметр плоскої круглої котушки;  $N$  – кількість витків.

Таблиця 2.1 – Конструкційні особливості запропонованої системи із двох котушок індуктивності

Величина	Значення
Питомий опір, $\rho_{Cu}$	$1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м
Відносна магнітна проникність міді, $\mu_{r.Cu}$	~1
Діаметр ділянки дроту, $d$	3 мм
Загальна довжина дроту кожної котушки, $l$	3,48 м
Зовнішній діаметр плоскої круглої котушки, $d_{out}$	150 мм
Кількість витків, $N$	9
Повітряний зазор	3 мм

### 2.3 Висновки до розділу

1. Проведено теоретичне дослідження конструктивних особливостей котушок й інших елементів магнітного кола системи безпроводної передачі енергії.
2. Крім конструкції системи, глибоко проаналізована типова двонаправлена система безпроводної передачі енергії , з точки зору передачі енергії як функції конкретних параметрів управління і як оптимізація ефективності.
3. Проведено аналіз методів керування у системах безпроводної передачі енергії.
4. Запропонована функціональна схема системи безпроводної передачі енергії для зарядки акумулятора ТЗ та конструкція передавальної та приймальної котушок.

### 3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Розрахунок електричних характеристик

Для розрахунку електричних характеристик зв'язаних котушок було виконано моделювання магнітного поля за допомогою програмного забезпечення FEMM 2D, яке використовує метод скінченних елементів [48]. Вихідними даними є геометричні розміри котушок, наведені у п. 2.2, та величина струму 26 А. На рис. 3.1 зображено результат програмного моделювання, а саме вертикальний розріз магнітного поля вздовж осі котушок. Кольори відповідають різним значенням результуючого магнітного поля навколо котушок. Для розрахунку магнітних характеристик зв'язаних котушок було проведено магнітостатичне моделювання, приймаючи, що магнітні характеристики не залежать від частоти, яка знаходиться у діапазоні від 0 до 150 кГц. 150 кГц – це максимальне значення частоти системи БПЕ.

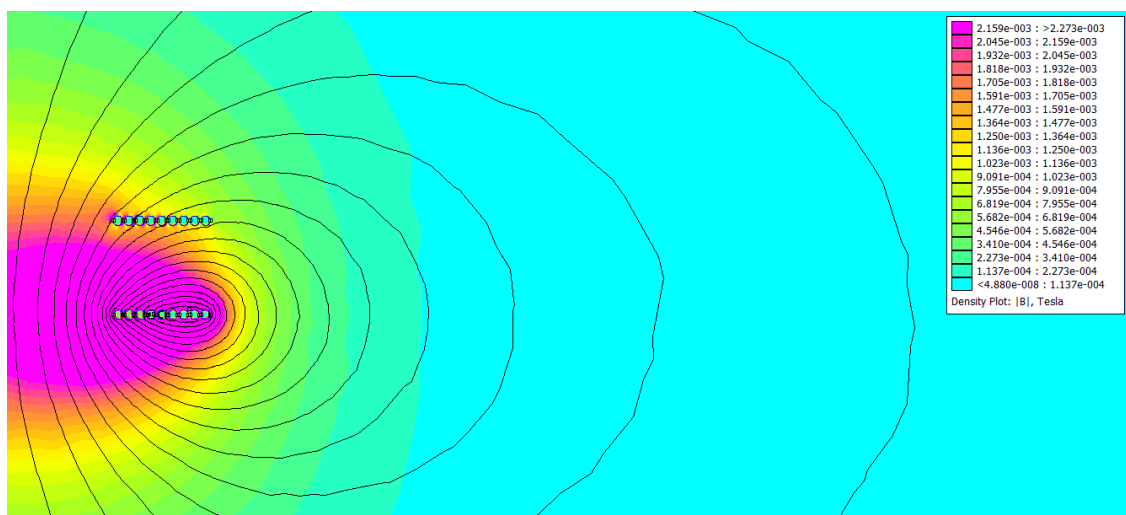


Рисунок 3.1 – Графічне представлення результатів моделювання густини магнітного потоку

Для того, щоб отримати самоіндуктивність первинної котушки  $L_1$ , було розглянуто потік отриманого магнітного поля через поверхню тієї ж котушки, а самоіндуктивність вторинної котушки  $L_2$  повинна бути такою ж, оскільки

катушки однакові. Загальне значення самоіндуктивностей рівне  $L$  (3.1). Для отримання взаємної індукції  $M$ , розглянуто потік магнітного поля через поверхню нижньої катушки. Опір на постійному струмі кожної катушки  $R_{dc}$ , розраховано за відомою формулою (3.2), вихідними даними до якої є питомий опір міді  $\rho_{Cu}$ , довжина провідника  $l$  та площі січення  $S$  (діаметр провідника 3 мм). В результаті розрахунків у FEMM 2D отримано значення електричних та магнітних характеристик катушок, які наведено у табл. 3.1.

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

де  $M$  – взаємоіндукція катушок;

$k$  – коефіцієнт зв'язку;

$L_1$  – самоіндуктивність первинної катушки;

$L_2$  – самоіндуктивність вторинної катушки.

$$R_{dc} = \rho_{Cu} \frac{l}{S}. \quad (3.2)$$

Таблиця 3.1 – Електричні та магнітні характеристики

Характеристика	Значення
$L = L_1 = L_2$	13 $\mu$ Н
$M$	4.9 $\mu$ Н
$k$	0.377
$R_{dc}$	8.2 мОм

На рис. 3.2 зображена імітаційна модель запропонованої системи БПЕ.



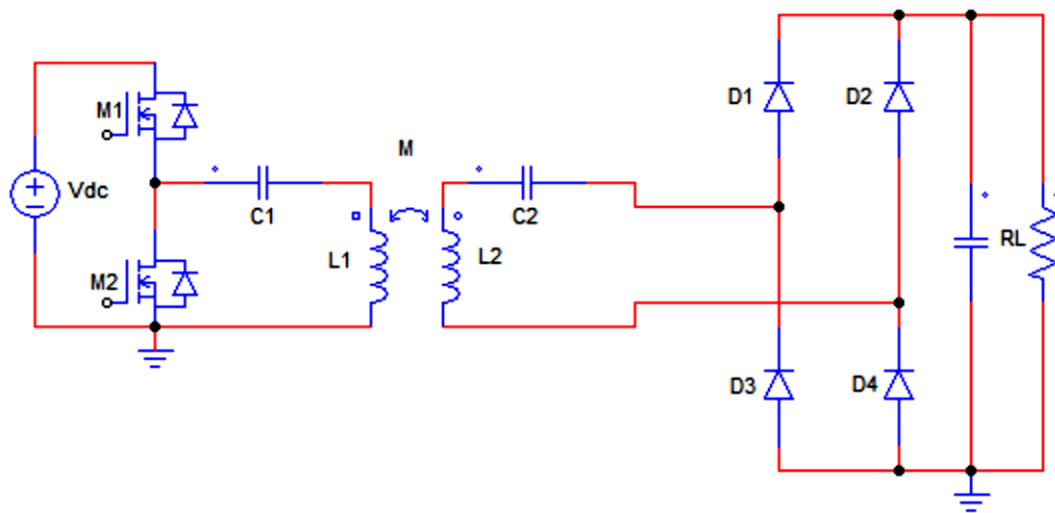


Рисунок 3.2 – Імітаційна модель системи БПЕ, створена за допомогою програмного забезпечення PowerSIM

DC-AC перетворювач на стороні передавача реалізований через напівмостову схему (MOSFET M1-M2); AC-DC на стороні приймача – це звичайний чотиридіодний випрямляч. Вихідні дані для імітаційної моделі наведені в табл. 3.1. А генератор струму на 2 струми працює як навантаження системи, імітуючи струм зарядки акумулятора. Компенсаційні конденсатори мають ємність 220 нФ при робочій частоті близько 100 кГц. Ця ємність є номінальною відповідно до таблиць виробників. Знайдемо реальну робочу частоту для такого значення ємності та індуктивності котушки 13  $\mu\text{H}$  за формулами (3.3 та (3.4). Підставивши вихідні дані отримано фактичну частоту 94,1 кГц. Інші електричні характеристики контурів представлені в табл. 3.2.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (3.3)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (3.4)$$

де  $f_1$  та  $f_2$  – резонансні частоти відповідно первинного та вторинного кіл, які повинні дорівнювати одна одній, якщо необхідно досягти подвійної мети: максимального коефіцієнта потужності та максимальної передачі потужності.

$C_1$  і  $C_2$ . – ємності конденсаторів первинного та вторинного кіл,  $C_1 = C_2$

Таблиця 3.2 – Електричні характеристики контурів

Характеристика	Значення
Номінальна потужність навантаження	96 Вт
Номінальна напруга постійного струму	48 В
Номінальний струм	2 А
Робоча частота	94.1 кГц

### 3.2 Двонаправлена безпроводна передача енергії

БПЕ добре підходить для ідеї двонаправленої передачі потужності, що означає, що потужність може надходити від мережі до навантаження або, як альтернатива, від навантаження до інших користувачів мережі. Двонаправлена безпроводна передача енергії (ДБПЕ), може бути використана для реалізації концепції Vehicle-to-Grid (V2G), що полягає у можливості використання акумулятора електротранспорту як елемента накопичення енергії для інших користувачів мережі або інших транспортних засобів. Ідея V2G належить до концепції активного попиту, де користувач виконує подвійну роль споживача та виробника електричної енергії.

На рис. 3.3 показана імітаційна модель системи ДБПЕ, реалізована у PowerSIM.

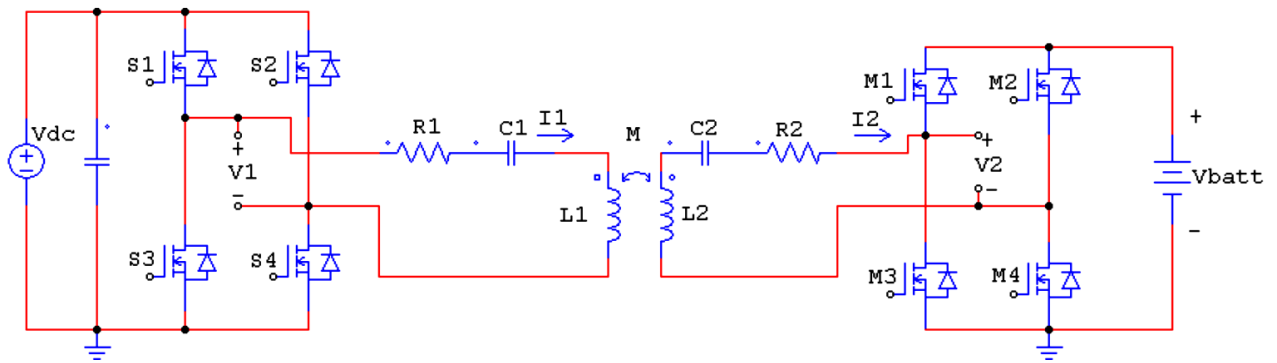


Рисунок 3.3 – Імітаційна модель системи ДБПЕ

Резистори  $R_1$  та  $R_2$  – активний опір провідників, який спричиняє втрати потужності на первинній та вторинній сторонах відповідно. Перетворювач DC-AC ( $S_1$ - $S_2$ - $S_3$ - $S_4$ ) з боку первинної сторони  $V_{dc}$  та перетворювач AC-DC ( $M_1$ - $M_2$ - $M_3$ - $M_4$ ) з боку вторинної сторони  $V_{batt}$  – це два реверсивні випрямлячі, що генерують напругу  $V_1$  та  $V_2$  відповідно. Залежно від фазової затримки між  $V_1$  та  $V_2$  можна визначити напрямок потоку енергії. Якщо потрібна передача енергії, спрямована на зарядку акумулятора, повинен відбутися фазовий зсув  $V_1$  та  $V_2$ . Якщо бажаний максимальний коефіцієнт потужності, фазовий зсув встановлюється на  $90^\circ$ . Далі, проведемо математичний аналіз цієї схеми ДБПЕ ефективності передачі енергії та її залежність від різних факторів.

### 3.3 Аналіз потужності, яка передається у системі ДБПЕ

Для того, щоб контролювати кількість та напрямок потужності, що протікає в системі ДБПЕ, було проведено аналіз електричного кола. Обчислення виконувалися у програмному забезпеченні MATLAB Simulink. Базуючись на схемі на рис. 3.3, можна зобразити спрощену схему, як показано на рис. 3.4.

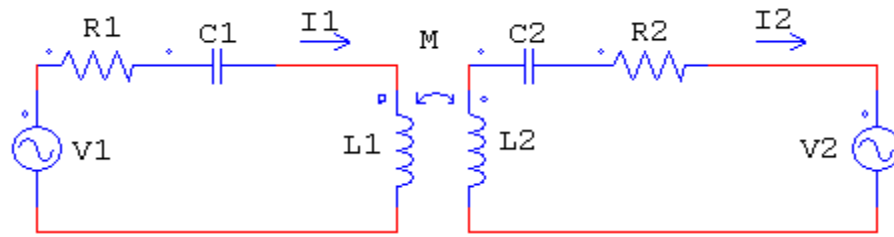


Рисунок 3.4 – Система БПЕ із джерелами змінної напруги V1 та V2

Джерела змінної напруги (рис.3.4) представляють первинні та вторинні напруги (рис. 3.2), які генеруються перетворювачами DC-AC і AC-DC відповідно.

Зі схеми, зображеної на рис. 3.4, впливає наступна система рівнянь:

$$\begin{cases} \vec{V}_1 = \left[ j\omega L_1 - M + j\omega M + \frac{1}{j\omega C_1} + R_1 \right] \vec{I}_1 + j\omega M \vec{I}_2; \\ j\omega M \vec{I}_1 = \left[ j\omega L_2 - M + j\omega M + \frac{1}{j\omega C_2} + R_2 \right] \vec{I}_2 + \vec{V}_2. \end{cases} \quad (3.5)$$

У типовому випадку, коли напруги на первинному та вторинному мостах мають фазово-модульовану прямокутну форму з амплітудами  $V_1$  та  $V_2$ , амплітуди їх основних гармонік будуть рівні  $\frac{4}{\pi}V_1$  та  $\frac{4}{\pi}V_2$ . Тому середньоквадратичні значення дорівнюють  $\frac{2\sqrt{2}}{\pi}V_1$  і  $\frac{2\sqrt{2}}{\pi}V_2$  відповідно. Фазові вектори  $V_1$  та  $V_2$ , враховуючи що  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  є їхніми фази, задаються рівняннями (3.6):

$$\begin{cases} \vec{V}_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_1 \cos \varphi_1 + j \cdot \sin \varphi_1 ; \\ \vec{V}_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_2 \cos \varphi_2 + j \cdot \sin \varphi_2 . \end{cases} \quad (3.6)$$

Зсув по фазі  $\varphi_D$  визначається як різниця фаз між  $V_2$  і  $V_1$ , тоді як фазовий зсув  $\varphi_S$  визначається як різниця фаз між сигналами керування, що подаються на дві ніжки повномостового перетворювача. Отже зсув по фазі визначається рівнянням (3.7).

$$\varphi_D = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (3.7)$$

Реальна потужність на первинній та вторинній сторонах:

$$\begin{aligned} P_1 &= \operatorname{Re} \vec{V}_1 \vec{I}_1 ; \\ P_2 &= \operatorname{Re} \vec{V}_2 \vec{I}_2 . \end{aligned} \quad (3.8)$$

З (3.5) знаходимо фазовий вектор струму первинного кола:

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{V}_1 - \frac{j\omega M \vec{V}_2}{R_2}}{R_1 + \frac{\omega M^2}{R_2}}. \quad (3.9)$$

Отже, спряжений фазовий вектор струму первинного кола визначається за:

$$\vec{I}_1^* = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left[ \frac{V_1 \cos \varphi_1 - j \cdot \sin \varphi_1 + \frac{\omega M V_2}{R_2} \cos \varphi_2 - j \cdot \sin \varphi_2}{R_1 + \frac{\omega M^2}{R_2}} \right]. \quad (3.10)$$

Відповідно до (3.6), (3.8) та (3.10) реальна потужність у первинному колі становить:

$$P_1 = \frac{8}{\pi^2} \left[ \frac{V_1^2 + \frac{V_1 V_2 \omega M}{R_2} \sin \varphi_D}{R_1 + \frac{\omega M^2}{R_2}} \right]. \quad (3.11)$$

З (3.5) виникає фазовий вектор струму вторинного кола:

$$\vec{I}_2 = \frac{\frac{j\omega M \vec{V}_1}{R_1} - \vec{V}_2}{R_2 + \frac{\omega M^2}{R_1}}. \quad (3.12)$$

Спряжений фазовий вектор струму вторинного кола визначається за:

$$\vec{I}_2^* = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left[ \frac{\frac{\omega M V_1}{R_1} - j \cdot \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1 - V_2 \cos \varphi_2 + j \cdot \sin \varphi_2}{R_2 + \frac{\omega M^2}{R_1}} \right]. \quad (3.13)$$

Відповідно до (3.6), (3.8) та (3.13) реальна потужність у вторинному колі становить:

$$P_2 = \frac{8}{\pi^2} \left[ \frac{\frac{V_1 V_2 \omega M}{R_1} \sin \varphi_D - V_2^2}{R_2 + \frac{\omega M^2}{R_1}} \right]. \quad (3.14)$$

Фактичні середньоквадратичні значення напруги у первинному та вторинному колі  $V_1$  та  $V_2$ , відповідно до їх значень фазового зсуву  $\varphi_{s1}$  та  $\varphi_{s2}$ , визначаються за наступними формулами:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{dc} \sin\left(\frac{\varphi_{s1}}{2}\right); \\ V_2 &= V_{batt} \sin\left(\frac{\varphi_{s2}}{2}\right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Підставивши (3.11) та (3.14) у (3.15), отримаємо вирази для розрахунку потужностей  $P_1$  та  $P_2$ :

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{V_{dc} + \sin\left(\frac{\varphi_{s1}}{2}\right)}{R_1 + \frac{\omega M^2}{R_2}} \left[ V_{dc} \sin\left(\frac{\varphi_{s1}}{2}\right) + \frac{V_{batt} \omega M \sin\left(\frac{\varphi_{s2}}{2}\right) \sin \varphi_D}{R_2} \right]; \\ P_2 &= \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{V_{batt} + \sin\left(\frac{\varphi_{s2}}{2}\right)}{R_2 + \frac{\omega M^2}{R_1}} \left[ \frac{V_{dc} \omega M \sin\left(\frac{\varphi_{s1}}{2}\right) \sin \varphi_D}{R_1} - V_{batt} \sin\left(\frac{\varphi_{s2}}{2}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3.16)$$

### 3.4 Дослідження систем БПЕ з прямокутними котушками

З метою підвищення ефективності та стійкості до зміни просторового положення та геометрії котушок, проаналізовано системи БПЕ з не круглими форми котушок. Дослідження проведено відповідно до схеми, зображеної на рис. 3.3, у якій можлива двонаправлена передача потужності. Для оцінки ефективності системи використані рівняння (3.16). Обрано фазову затримку  $\varphi_D$  на  $90^\circ$ . Значення напруги живлення  $V_{dc}$  у первинному колі та напруги батареї  $V_{batt}$  на вторинному колі наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Напруги постійного струму в дослідженій системі

Напруга живлення постійного струму	Значення
$V_{dc}$	24 V
Напруга акумулятора	Значення
$V_{batt}$	36 V

Досліджено різні схеми індуктивного зв'язку з точки зору ефективності системи та стійкості до зміни просторового положення та геометрії котушок.

Мета дослідження – знайти найбільш ефективну систему бездротової системи зарядки акумуляторів E-bike. Досліджувані системи складаються з двох плоских котушок; кожна з них намотана мідним дротом діаметром 3 мм. Крок між двома витками становить 3,5 мм.

Запропоновані конструкції передбачають дві однакові котушки, таким чином мінімізуються втрати на розсіювання і добре працює двонаправлена передача потужності. Феромагнітні осердя не використовуються з метою зменшення ваги конструкції, так як система БПЕ використовуватиметься для зарядки E-bike. Що стосується запропонованої раніше конструкції, то на колесі велосипеда передбачається розміщення однієї котушки, іншої – під час стоянки на опорі, яка дотична до цього колеса.

Після ряду моделювань магнітного поля отримана еквівалентна електрична схема для кожного досліджуваного варіанту. Як інструмент моделювання було використано програмне забезпечення COMSOL Multiphysics, що працює з 3D-геометрією. Для отримання детальних моделей з точки зору самоіндуктивності та взаємної індуктивності враховано різні відстані та неточності виконання між первинною та вторинною котушкою.

Перший варіант, який розглянуто, складається з двох круглих котушок. 3D-модель цього варіанту вже описувалась раніше і представлена на рис. 2.7. Кожна котушка складається з плоскої спіральної обмотки, яка має 9 витків із зовнішнім діаметром 15 см.



Що стосується другого варіанту, то тут котушки знаходяться на площині  $x-y$ , а відстань між ними змінюється вздовж осі  $z$ . Кожна із котушок має форму подвійного кільця (DD) [39], тобто кожна котушка складається з двох квадратних частин, так званих "D", які з'єднані послідовно. В результаті, всередині конструкції є безперервна петля магнітного потоку, що генерується двома котушками DD. Це рішення забезпечить надійний магнітний зв'язок, який буде більш стійкий до зміни просторового положення та геометрії котушок. Найдовший розмір становить менше 30 см, що обмежується розміром велосипедного колеса. На рис. 3.4 та 3.5 зображено 3D-модель системи з двох DD котушок. Кожна «D» – це плоска квадратна обмотка, виконана з 9 витків. Відповідно до розмірів велосипедного колеса, для даного варіанту досліджено три різних розміри. Зберігаючи форму і пропорції всієї конструкції для кожної котушки, довжина найкоротшої сторони, що належить до найменшого квадрата (позначені на малюнку "s"), змінюється відповідно до наступних трьох значень: 4 см, 5 см, 6 см. Відповідні значення найдовшого розміру, тобто сторони вздовж осі  $y$ , такі: 21 см, 23 см, 25 см.

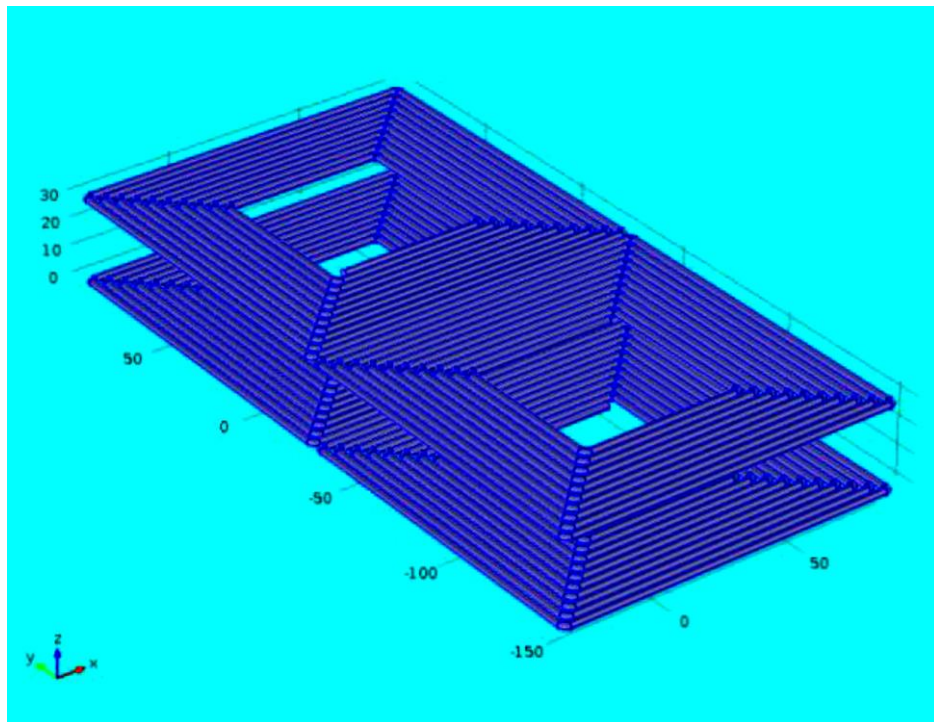


Рисунок 3.4 – 3D-вигляд DD котушок

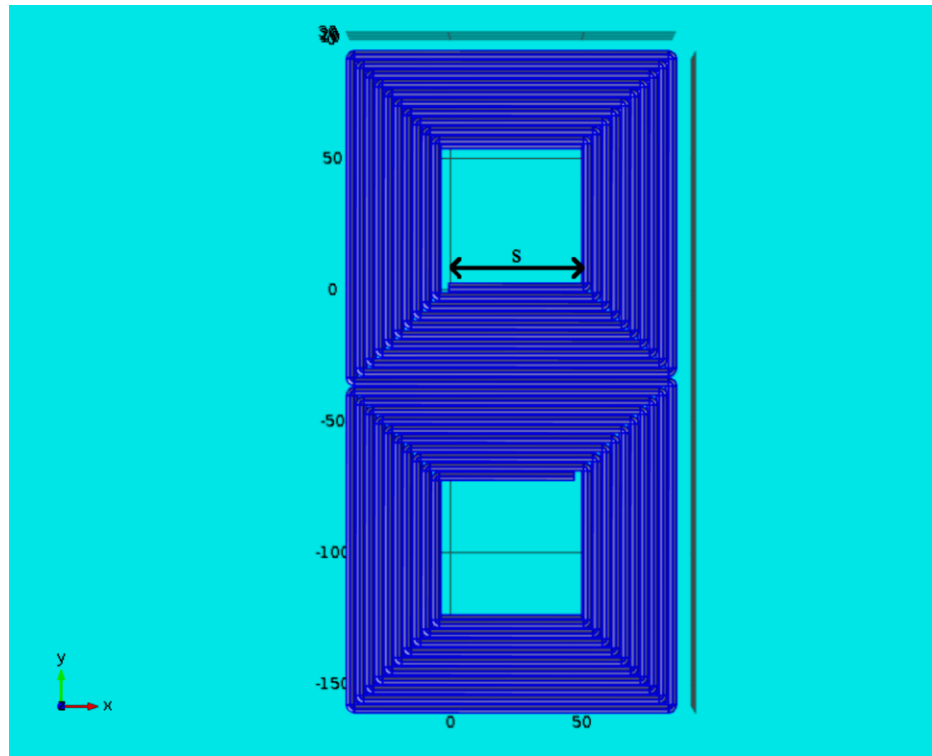


Рисунок 3.5 – 2D-вигляд котушок DD на площині  $x$ - $y$

Для кожного досліджуваного варіанту проведено моделювання магнітного поля з урахуванням різної відстані та відхилень між двома котушками. Повітряний зазор між котушками змінювався від 1 см до 3 см вздовж осі  $z$ , тоді як зміщення на площині  $x$ - $y$  коливалося від 0 до 2 см для кожної з двох осей.

В результаті моделювання отримано значення самоіндукції  $L$  та взаємоіндукції  $M$  досліджуваних котушок. У таблиці 3.4 наведено наступні характеристики досліджуваних котушок самоіндукція  $L$ , довжини  $l$  провідника кожної котушки та їх активний опір  $R_{ohm}$ . Значення  $R_{ohm}$  розраховано відповідно до закону Ома, тобто (3.2), щодо мідного провідника, довжина якого  $l$ , площа перерізу  $S$  і питомий опір  $\rho_{Cu}$ , тобто  $1,68 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

На рисунках 3.6 – 3.9 наведено результати моделювання зміни взаємоіндукції в залежності від відстані на осі  $z$  та зсуву між котушками в площині  $x$ - $y$ . Жовтий, синій та червоний кольори відповідають ширині повітряного проміжку 1 см, 2 см та 3 см відповідно.

Для кожного кольору градаційне затінення відноситься до змін  $M$  щодо зміщення в площині  $x$ - $y$ , як це підкреслюється легендами кольорів.

Таблиця 3.4 – Характеристики досліджуваних котушок

Параметр	Круглі котушки	Котушки DD (s = 4 см)	Котушки DD (s = 5 см)	Котушки DD (s = 6 см)
$L$ [ $\mu\text{H}$ ]	13	20,69	24,56	29,47
$l$ [м]	3,4	6,01	6,8	7,59
$R_{ohm}$ [МОм]	8,1	14,3	16,2	18

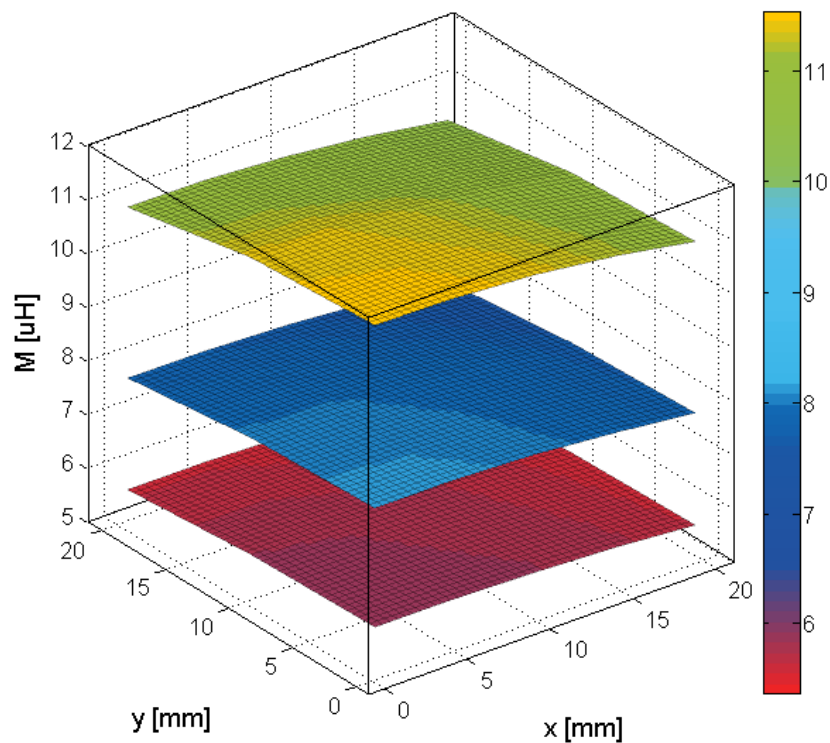


Рисунок 3.6 – Залежність взаємоіндукції  $M$  круглих котушок від зсувів у площині  $x$ - $y$  для трьох різних значень повітряного зазору по осі  $z$  (жовтий: 1 см; синій: 2 см; червоний: 3 см)

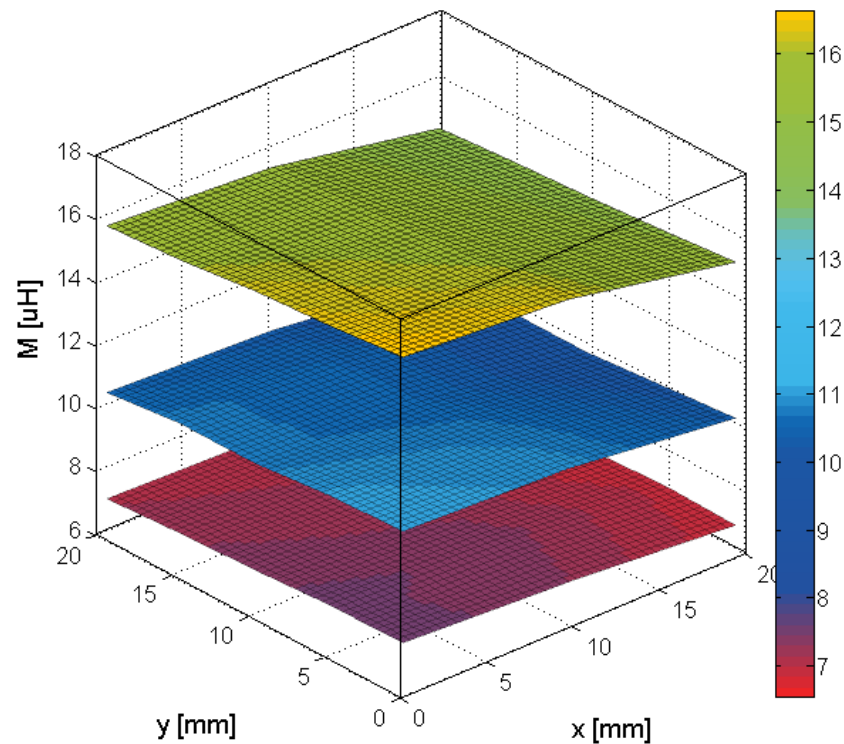


Рисунок 3.7 – Залежність взаємiндукцiї  $M$  котушок DD ( $s = 4$  см) вiд зсувiв у площинi  $x$ - $y$  для трьох рiзних значень повiтряного зазору по осi  $z$  (жовтий: 1 см; синiй: 2 см; червоний: 3 см)

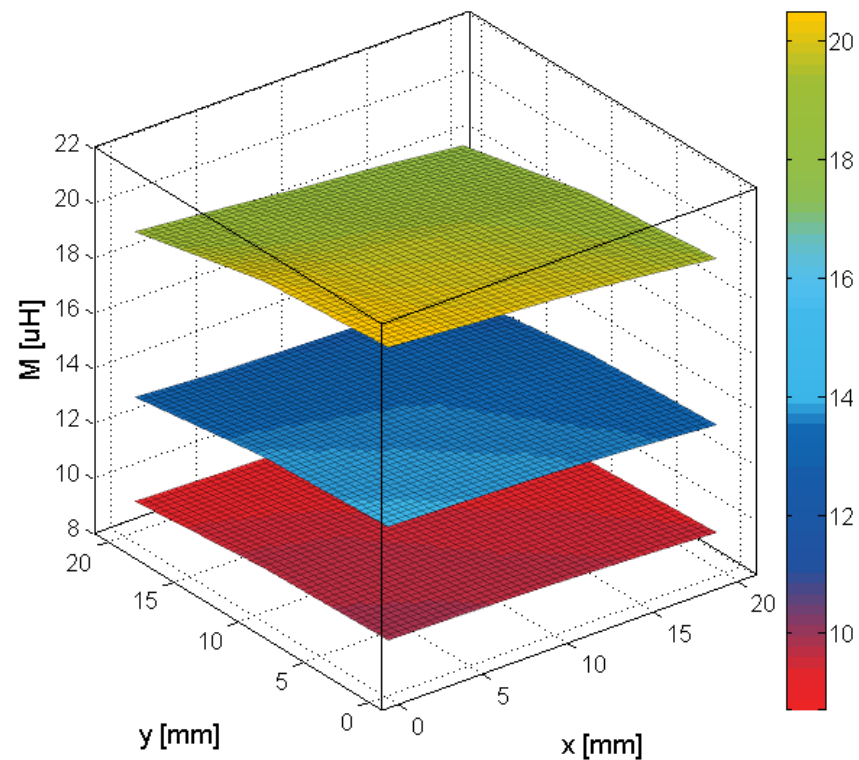


Рисунок 3.8 – Залежність взаємiндукцiї  $M$  котушок DD ( $s = 5$  см) вiд зсувiв у площинi  $x$ - $y$  для трьох рiзних значень повiтряного зазору по осi  $z$  (жовтий: 1 см; синiй: 2 см; червоний: 3 см)

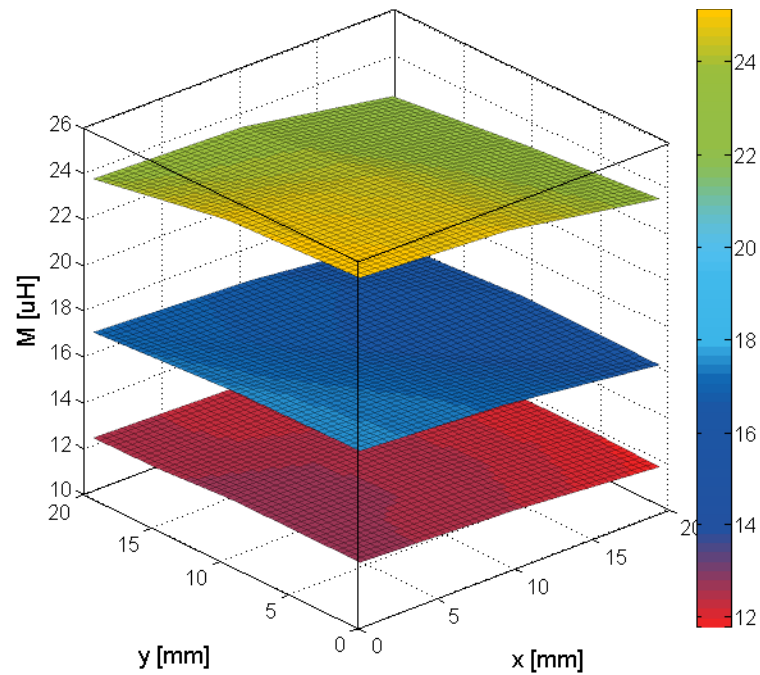


Рисунок 3.9 – Залежність взаєміндукції  $M$  котушок DD ( $s = 6$  см) від зсувів у площині  $x$ - $y$  для трьох різних значень повітряного зазору по осі  $z$  (жовтий: 1 см; синій: 2 см; червоний: 3 см)

В результаті аналізу отриманих результатів модулювання встановлено, що найкращим варіантом з точки зору стійкості до зміщення є останній, який представлений котушками DD із  $s = 6$  см. Дійсно, для цього варіанту варіація  $M$  вздовж осей  $x$  та  $y$  є порівнянною з круговими котушками, і, фокусуючись лише на осі  $y$ , вона виявляється майже нульовою. Зміну значення  $M$  для різного взаємного розташування котушок наведено у табл. 3.5. У цій таблиці відсоткова зміна взаєміндукції рахується відносно значення, яке має місце у положенні ідеального вирівнювання коли зміщення відсутні ( $x = 0$ ;  $y = 0$ ).

Також проведено розрахунок ефективності передачі потужності при зміні ширини повітряного зазору між котушками, і робочої частоти системи. Потужності розраховувалися за формулами (3.16) де  $R_1$  і  $R_2$  представляють опір первинного та вторинного кіл, який включає як опір котушки і опір MOSFET. Якщо використовувати багатожильний дріт, літцендрат, для індуктивно зв'язаних котушок, то поверхневим ефектом можна знехтувати, так що єдиним

опором у котушок є омичний, представлений  $R_{ohm}$ . Отже  $R_{ohm}$  включений у  $R_1$  і  $R_2$ .

Таблиця 3.5 – Відносна зміна значення  $M$  для різного взаємного розташування котушок

$M_{var}, \%$ для круглих котушок			
	x = 2 см y = 0 см	x = 0 см y = 2 см	x = 2 см y = 2 см
z = 1 см	5,63	5,39	10,47
z = 2 см	5,21	4,92	9,91
z = 3 м	4,74	4,55	9,22
$M_{var}, \%$ для DD котушки (s = 4 см)			
	x = 2 см y = 0 см	x = 0 см y = 2 см	x = 2 см y = 2 см
z = 1 см	8,77	5,35	13,66
z = 2 см	7,73	5,85	13,89
z = 3 см	9,59	6,37	14,14
$M_{var}, \%$ для DD котушки (s = 5 см)			
	x = 2 см y = 0 см	x = 0 см y = 2 см	x = 2 см y = 2 см
z = 1 см	7,32	5,54	13,38
z = 2 см	7,01	4,6	11,72
z = 3 см	6,43	4,31	11,87
$M_{var}, \%$ для DD котушки (s = 6 см)			
	x = 2 см y = 0 см	x = 0 см y = 2 см	x = 2 см y = 2 см
z = 1 см	6,33	5,54	11,19
z = 2 см	7,18	2,75	9,12
z = 3 см	6,67	1,79	7,36



На графіках рисунків 3.10 – 3.12 зображено залежність ефективності системи БПЕ від частоти для наступних значень відстані між котушками відповідно: 1 см, 2 см, 3 см. У цьому розрахунку не враховано зміщення координат у площині  $x$ - $y$ , лише по  $z$ .

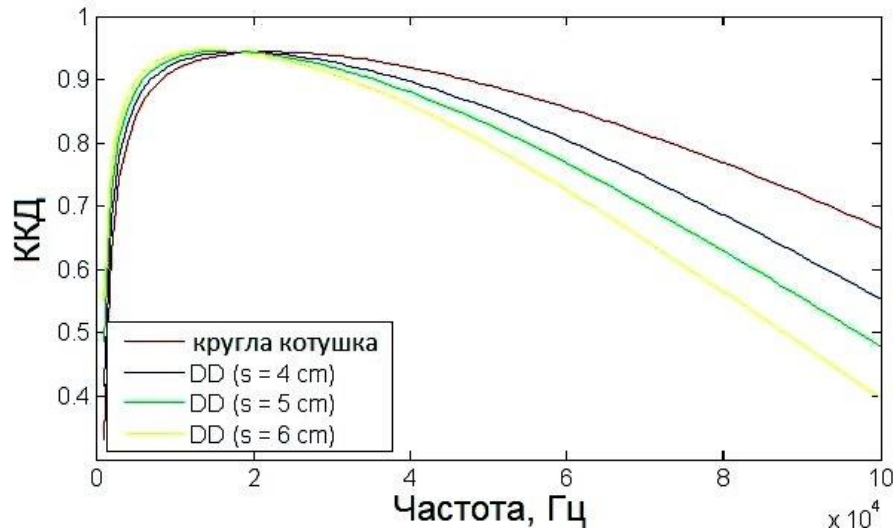


Рисунок 3.10 – Залежність ефективності системи БПЕ від частоти для ширини повітряного зазору між двома котушками 1 см

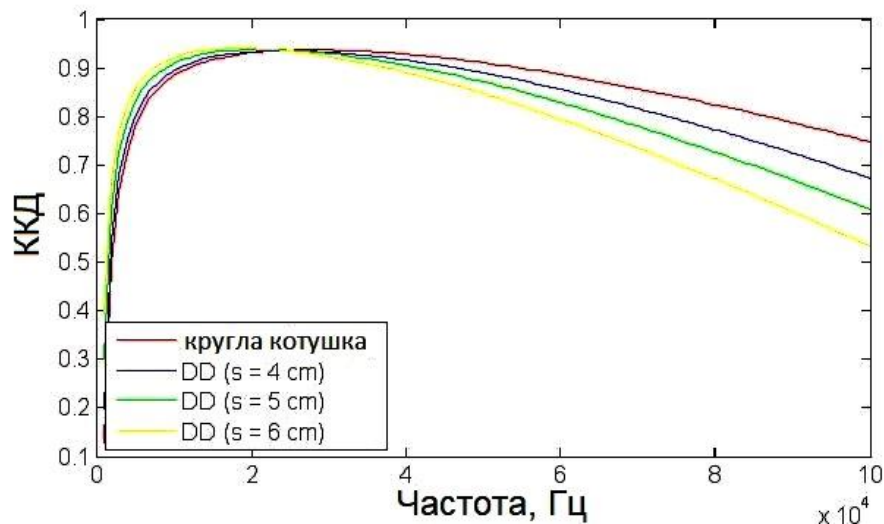


Рисунок 3.11 – Залежність ефективності системи БПЕ від частоти для ширини повітряного зазору між двома котушками 2 см

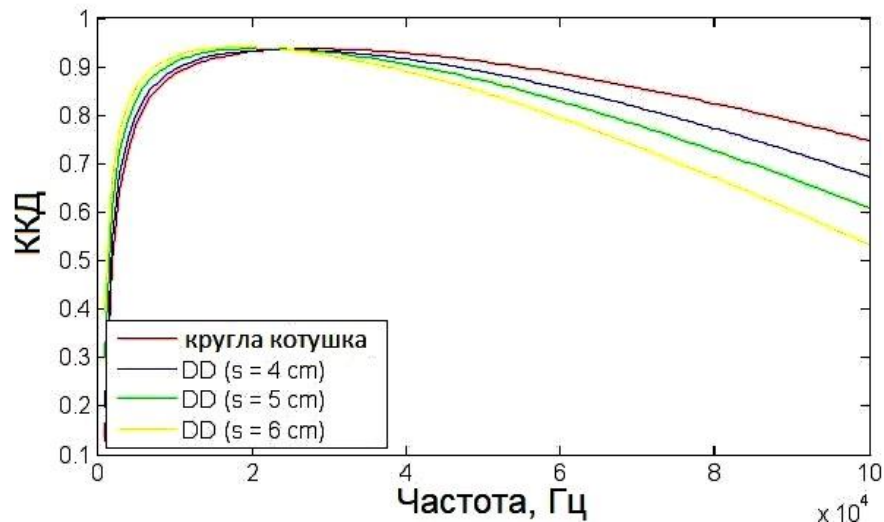


Рисунок 3.12 – Залежність ефективності системи БПЕ від частоти для ширини повітряного зазору між двома котушками 3 см

Частота 30 кГц є найбільш ефективною робочою частотою, оскільки на цій частоті 4 досліджувані магнітно зв'язані котушки приблизно демонструють максимальну ефективність. Отже, компенсаційні конденсатори повинні мати ємність відповідно до цієї частоти.

Останній етап порівняння серед досліджуваних варіантів магнітно зв'язаних котушок стосується впливу на енергетичну ефективність відхилення між первинною котушкою, підключеною до електромережі, та вторинною котушкою, підключеною до акумулятора електровелосипеда. Припустимо, що основна котушка лежить на опорі, що тримає велосипед під час паркування та що вторинна котушка лежить на передньому колесі велосипеда, паралельно первинному. Може бути не ідеальне вирівнювання між котушками щодо площини, яка паралельна їм (що відповідає площині  $x-y$ ), так що дослідження наслідків цього відхилення на ефективність бездротової передачі енергії є актуальним. На рис. 3.13-3.15 показано залежність ефективності системи магнітно зв'язаних котушок на частоті 30 кГц від взаємодукції  $M$ .



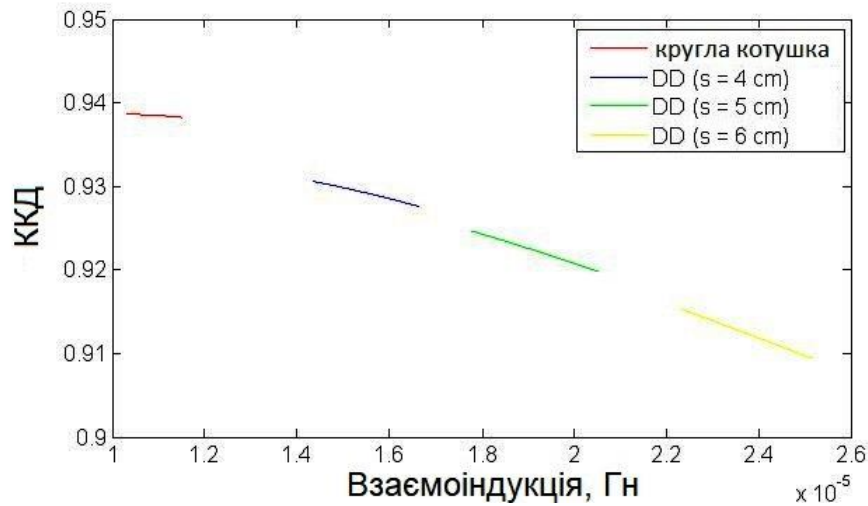


Рисунок 3.13 – Залежність ефективності системи магнітно зв'язаних котушок на частоті 30 кГц від взаємодуції  $M$  для ширини повітряного зазору між двома котушками 1 см

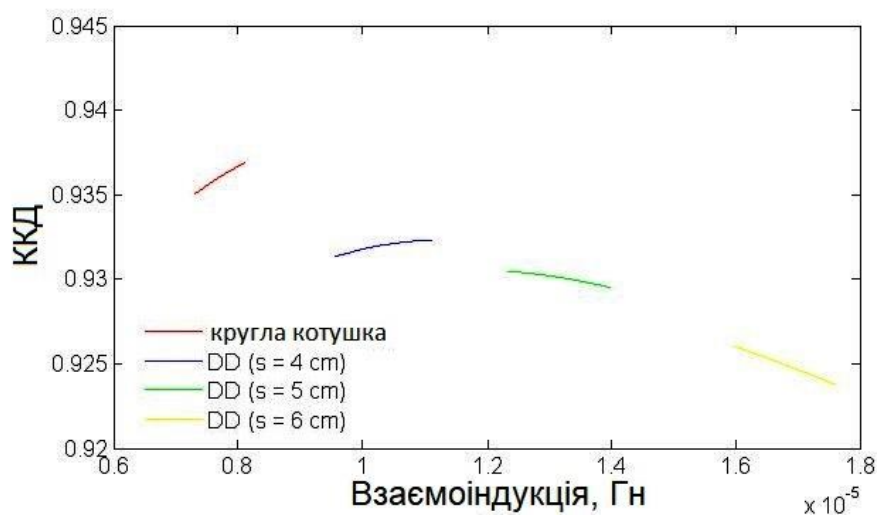


Рисунок 3.14 – Залежність ефективності системи магнітно зв'язаних котушок на частоті 30 кГц від взаємодуції  $M$  для ширини повітряного зазору між двома котушками 2 см

Розрахунки виконані для різної ширини повітряного зазору: 1 см, 2 см та 3 см. Кожна крива ефективності відповідає зміні взаємодуції  $M$  для окремого типу котушок. Ця зміна спричинена зміщенням котушок одна відносно одної у паралельних площинах на відстані від 0 до 2 см. Результати програмних розрахунків представлено графічно на рис. 3.13-3.15.

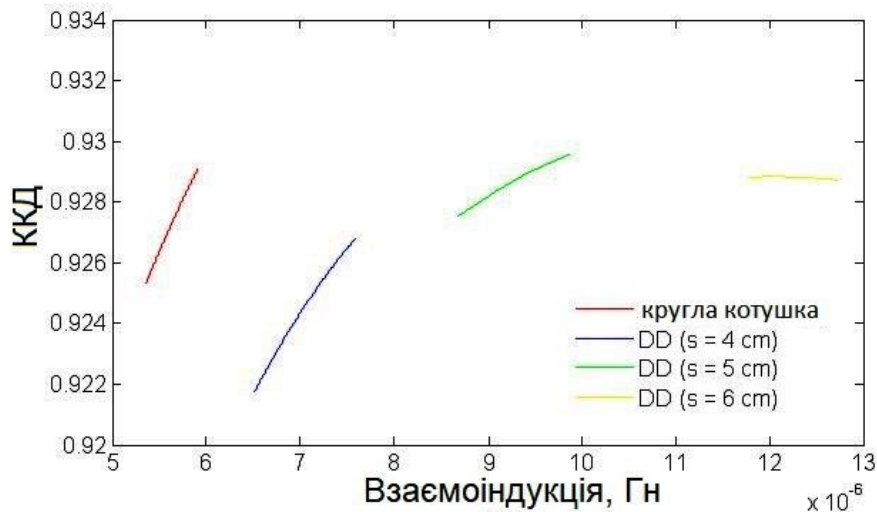


Рисунок 3.15 – Залежність ефективності системи магнітно зв'язаних котушок на частоті 30 кГц від взаємної індукції  $M$  для ширини повітряного зазору між двома котушками 3 см

Як показано на рисунках, котушки DD мають, особливо для значних відстаней між котушками, добру стійкість до зсувів у паралельних площинах..

### 3.5 Особливості системи керування

Для регулювання потоку потужності до акумулятора потрібна система керування БПЕ. Хоча керування може бути реалізоване різними способами відповідно до особливостей схем, загальною метою є отримання бажаного виходу потужності для заряду акумулятора.

Як пояснено в розділі 1, основними етапами зарядки типової літій-іонної батареї є етап постійного струму та етап постійної напруги. Тому керуючі дії залежать від конкретного етапу процесу зарядки акумулятора.

На етапі постійного струму метою є підтримка струму акумулятора на фіксованому рівні з певним значенням, тоді як на етапі постійної напруги напруга акумулятора повинна підтримуватися на певному рівні. Схема ємнісної компенсації запропонованої системи БПЕ є послідовно-послідовною (SS). В цьому випадку керування є більш ефективним на етапі постійного

струму. Якщо робочою частотою системи обрано сталу частоту, керувати простіше на етапі постійної напруги.

### 3.6 Алгоритм підвищення енергоефективності

Енергоефективність (ККД) системи визначається як функція від фазового зсуву і визначається як:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.17)$$

Відповідно до (3.16) та (3.17) проведено розрахунки та отримано просторову діаграму. Проекції енергоефективності  $\eta$  на площину  $(\varphi_{S1} - \varphi_{S2})$  цієї діаграми показані на рис. 3.16 та рис. 3.17. Також показані контурні лінії потужності заряду акумулятора  $P_2$ , які отримані відповідно до (3.16). Кожна контурна лінія являє собою постійний локус потужності. Зображені контурні лінії представляють рівні потужності до 200 Вт на рис. 3.14 та до 160 Вт на рис. 3.17.

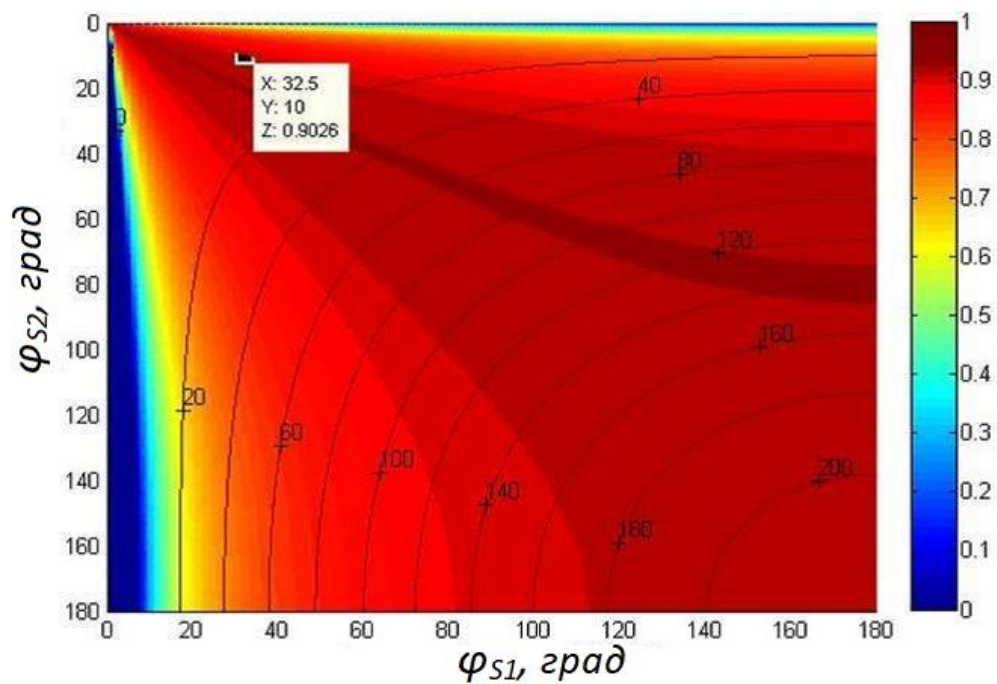


Рисунок 3.16 – Колірне поле енергоефективності  $\eta$  та контурні лінії потужності  $P_2$ (Вт) як функції від  $(\varphi_{S1} - \varphi_{S2})$ :  $R_1=R_2= 0,125$  Ом

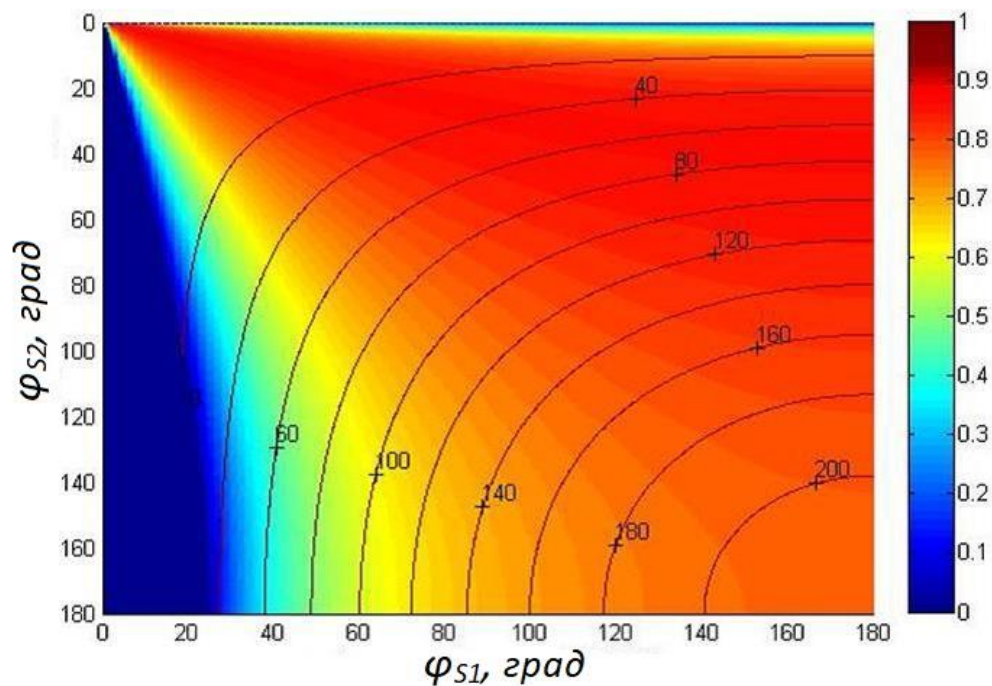


Рисунок 3.17 – Колірне поле енергоефективності  $\eta$  та контурні лінії потужності  $P_2$ (Вт) як функції від  $(\varphi_{S1} - \varphi_{S2})$ :  $R_1 = 0,425$  Ом;  $R_2 = 0,125$  Ом

Підставляючи різні значення опорів  $R_1$  і  $R_2$ , результати показують, що максимальна точка ефективності для конкретного рівня потужності залежить від цих опорів.  $R_1$  і  $R_2$  є еквівалентними опорами на первинній і вторинній сторонах.

Через залежність максимальної ефективності від конкретної системи, що включає втрати потужності, які нелегко точно визначити, пропонується алгоритм, спрямований на визначення та фіксацію точки максимальної ефективності. Це фактично алгоритм відстеження потужності, що базується на збуренні двох змінних керування, поки не буде досягнуто точки максимальної ефективності та зафіксовано необхідний рівень потужності. Алгоритм базується на фактичному методі «збурення та спостереження», як показано на рис. 3.18.

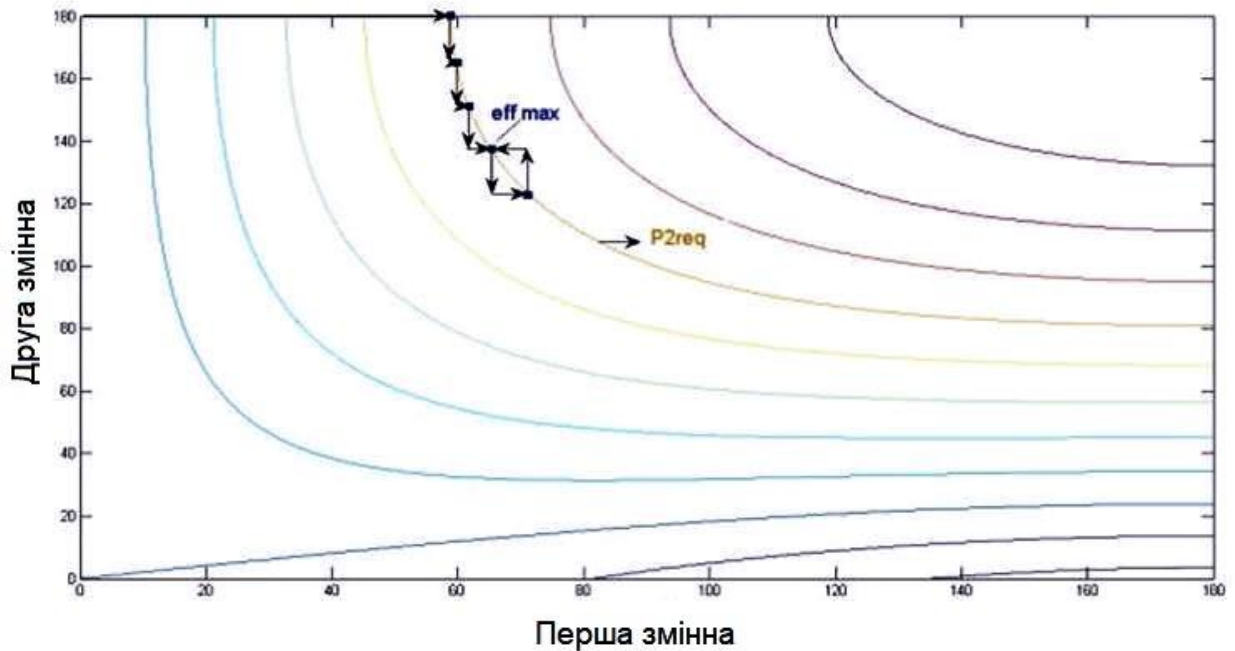


Рисунок 3.18 – Алгоритм відстеження потужності для максимізації ефективності

Періодично перша змінна збільшується поетапно. Коли відбирається необхідний рівень потужності, перша змінна підтримується постійною, а інша змінюється на крок. Після цього перша змінна знову збільшується поетапно, доки не буде досягнутий необхідний рівень потужності. Кожного разу, коли досягається рівень потужності, ефективність реєструється до тих пір, поки максимальний рівень ефективності не буде досягнутий на цій кривій рівня потужності. Після кожного кроку необхідно зачекати певний проміжок часу, щоб відібрати та утримати поточний рівень потужності, щоб система могла мати достатньо часу для досягнення стійкого стану. Період вибірки встановлюється рівним 10 мс, тоді як час очікування після кожного кроку становить 7,5 мс. Алгоритм був реалізований через моделювання, проведене PowerSIM [49]. Двома змінними керування є фазова затримка  $\varphi_D$  та фазовий зсув  $\varphi_S$  між  $V_2$  та  $V_1$  та фазового зсуву повного моста в системі, представлений на рис. 3.19, де використовується напівмостова схема. Навіть якщо максимальна ефективність виникає для  $\varphi_D$ , який дорівнює  $90^\circ$ , що робить алгоритм із 2 змінними марним, правильність реалізованого алгоритму

підтверджена шляхом порівняння результатів моделювання та аналітичної моделі з точки зору максимального рівня ефективності та максимальної точки ефективності.

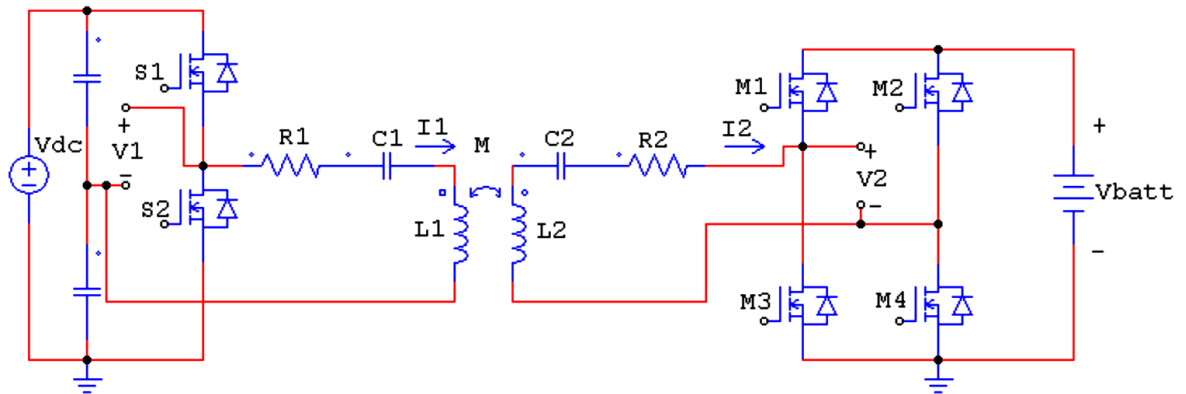


Рисунок 3.19 – Модель системи БПЕ з напівмостовою схемою на первинній стороні та повномостовою схемою на вторинній стороні

### 3.7 Висновки до розділу

1. Запропонована система БПЕ для зарядки акумулятора на електричному ТЗ – E-Bike. Рівень потужності заряду коливається від 100 Вт до 250 Вт. Навантаженням служить акумулятор LiFePO<sub>4</sub> на напругу 36 В та ємністю 10 А·год.
2. Після детального опису методики розрахунку проаналізовано альтернативну систему БПЕ, яка може працювати в режимі двонаправленої передачі потужності. Отримано потужність та енергоефективність як функції двох параметрів керування, таких як затримка фази та зсув фази. Методику пошуку максимальної енергоефективності перевірено за допомогою програмного моделювання.
3. Запропоновано алгоритм підвищення енергоефективності передачі енергії та продемонстровано результати моделювання, які збігаються із результатами розрахунків по запропонованій методиці.

4. Досліджено альтернативні варіанти котушок побудованих за DD системою з метою встановлення найкращої конструкції з точки зору ефективності системи та стійкості до зміщень між котушками.
5. Проведено дослідження зміни взаємодукції, в залежності від взаємного розташування котушок та при різних повітряних зазорах, за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення – 3D-магнітного симулятора. Встановлено, що найменш чутливі до цих змін котушки побудованих за DD системою.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Можливість виникнення статичної електрики та заходи боротьби з нею

Статична електрика – це процес утворення і розділення зарядів у просторі при контакті двох матеріалів, якщо хоча б один з них є діелектриком. Підвищений рівень статичної електрики відноситься до групи фізичних небезпечних і шкідливих виробничих факторів [50].

Суть електризації заключається в тому, що діелектрики за певних умов стають електрично зарядженими. При цьому заряди не виникають і не зникають, а переходять з одного електризованого тіла на інше, накопичуються на поверхнях їх стикування чи переміщуються в межах одного й того ж тіла. Статична електрика може з'являтися на тілах і через індукцію, тобто через взаємодію на відстані. В основному виробництві харчової промисловості це можуть бути процеси помелу зерна, просіювання, транспортування трубопроводах борошна, процеси, пов'язані з приготуванням цукрової пудри, перевезенням чи транспортуванням по трубопроводах спирту, сухих дріжджів, розміщенням і фільтруванням рідин; технологічні процеси, пов'язані із застосуванням плоскопасових передач, транспортерів і т.д.

Якщо напруженість електричного поля перевищує електричну міцність середовища (повітря), то відбувається розряд статичної електрики. Основною причиною, що характеризує здатність різних матеріалів проводити струм, а також визначає їх здатність до електризації, є питомий електричний опір. Умовно прийнято, що при питомому електричному опорі речовин і матеріалів порядку менше 10 Ом·м заряди не накопичують і безпеки не являють. Якщо ж опір високий і велика швидкість відриву поверхні, то заряди зберігаються. Величина зарядів визначається природою матеріалу і швидкістю розділення поверхонь, тобто інтенсивністю технологічного процесу.



Розряди статичної електрики являються одними з можливих імпульсів спалахування і вибухів в харчовій промисловості, що зв'язано, в першу чергу, із застосуванням сильно електризуючих речовин і матеріалів (горючі рідини, пил органічного походження). Електризація рідин приводить до спалахування і вибухів втричі частіше, ніж електризація дрібнодисперсних матеріалів, оскільки мінімальна енергія запалювання пилово-вітряних сумішей з 10...100 раз менше. При протіканні рідин величина заряду залежить від діелектричної сталої, її забрудненості, шорсткості стінок, швидкості протікання і діаметра труб.

Захист від статичної електрики та її небезпечних проявів повинен здійснюватись в двох напрямках: усунення електричних зарядів або зменшення їх до безпечних величин.

Апарати, машини, пристрої, які можуть стати джерелами виникнення зарядів статичної електрики, повинні бути заземлені не менше ніж у двох місцях незалежно від заземлення усього технологічного ланцюга.

Звичайні заземлюючі пристрої для захисту від розрядів статичної електрики об'єднують із заземлюючими пристроями для електрообладнання.

Заземлення повинно бути здійснене тільки паралельним приєднанням захисного обладнання. Допустимий опір заземленого пристрою для захисту від статичної електроенергії у вигляді малих струмів витрат допускається не більше 100 Ом.

Гнучкі трубопроводи для перекачування рідин, які здатні генерувати заряди (спирт, бензин, гас тощо), повинні мати металеве заземлене оплетення, а вихідні штуцери мають бути виконані із кольорових металів і з'єднані із заземленим металевим оплетенням.

Серед інших заходів, направлених на заземлення небезпечних проявів розрядів статичної електрики, слід відмітити такі, як заміна плоских пасів текстурними (клиновими); недопущення розприскування рідин при їх розливанні в ємності шляхом опущення завантажувальних труб на відстань не більше 0,2 м від днища приймальної посудини; зміна швидкості переміщення твердих і рідких матеріалів та ін.

## 4.2 Фізичні основи електробезпеки

Величина струму, що проходить через тіло людини при її попаданні під напругу, в найбільшій мірі визначає тяжкість ураження. Для розробки технічних і організаційно-технічних заходів і засобів профілактики електротравм важливо знати, від яких конструктивних особливостей електроустановок, їх робочих параметрів і стану залежить можлива величина струму через людину при потраплянні під напругу. Крім того, важливо, щоб весь електротехнічний персонал, усі працівники, робота яких пов'язана з експлуатацією електроустановок, чітко розуміли, чим обумовлена, що є причиною тієї чи іншої вимоги з електробезпеки. Таке знання, розуміння вимог чинних нормативів з електробезпеки сприятиме дотриманню їх працівниками, і якраз розуміння цих вимог відрізняє працівників п'ятої групи з електробезпеки від четвертої, і є обов'язковою складовою їх професійної підготовки з питань безпеки [50].

У реальній електричній мережі (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі розподіляється по всій довжині мережі — опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більша протяжність мережі, тим більше ізоляторів, які працюють паралельно, і менший загальний опір ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами. На практиці ізоляція струмопроводів виконується з реальних діелектриків, питомий опір яких не дорівнює нескінченності. Внаслідок старіння ізоляції, її частого зволоження, забруднення, нагріву, дії агресивного середовища тощо, питомий опір ізоляції знижується. Тому кожна ділянка довжини проводу має опір ізоляції певного значення або провідність, яка відрізняється від нуля, а при роботі реальної мережі мають місце постійні втрати струму (виток струму) через ізоляцію і землю. Таким чином, незважаючи на наявність ізоляції, токопроводи електромережі електрично зв'язані між собою і землею провідниками (ізоляцію) з великим опором.

Відповідно до зазначеного вище, кожна ділянка довжини проводу електромережі, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Тому при дотиці людини до неізольованої струмовідної частини (проводу тощо) функціонуючої електромережі струм через людину обумовлюється величиною напруги дотику і ємністю зазначеної вище системи. Ємнісна складова струму через людину при потраплянні під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень. Тому навіть при відключенні мережі від джерела живлення для ремонтно-профілактичних робіт тощо, необхідно заземлити кожен провід переносним заземленням і тільки після цього та перевірки відсутності напруги допускати персонал до роботи.

### **4.3 Надзвичайні ситуації природного характеру**

Надзвичайні ситуації природного характеру — це небезпечні геологічні, метеорологічні, гідрологічні морські та прісноводні явища, деградація ґрунтів чи надр, природні пожежі, зміна стану повітряного басейну, інфекційна захворюваність людей, сільськогосподарських тварин, масове ураження сільськогосподарських рослин хворобами чи шкідниками, зміна стану водних ресурсів та біосфери тощо.

На території України можливе виникнення практично всього спектру небезпечних природних явищ і процесів геологічного, гідрологічного та метеорологічного походження. До них належать великі повені, катастрофічні затоплення, землетруси та зсувні процеси, лісові та польові пожежі, великі снігопади та ожеледі, урагани, смерчі та шквальні вітри тощо.

Серед надзвичайних ситуацій природного походження в Україні найчастіше трапляються:

- геологічна небезпечні явища, такі, як зсуви, обвали та осипи, просадки земної поверхні різного походження та ін.;

- метеорологічна небезпечні явища, такі, як зливи, урагани, сильні снігопади, сильний град, ожеледь;
- гідрологічна небезпечні явища, такі, як повені, паводки, підвищення рівня ґрунтових вод та ін.;
- природні пожежі лісових та хлібних масивів;
- масові інфекції та хвороби людей, тварин і рослин.

Виходячи з визначення стихійного лиха як природного явища, що безпосередньо впливає на стан навколишнього середовища і добробут населення та є екстремальним екологічним фактором, територія України характеризується дуже складними умовами, що визначає полігенетичний характер стихійних лих та певні просторові закономірності їх прояву в різних географічних зонах і районах.

Особливості географічного положення України, атмосферні процеси, наявність гірських масивів, підвищень, близькість теплих морів зумовлює різноманітність кліматичних умов: від надлишкового зволоження в західному Поліссі до посушливого в Південній Степовій зоні. Виняткові кліматичні умови на Південному березі Криму, в горах Українських Карпат та Криму. У результаті взаємодії всіх цих факторів виникають небезпечні стихійні явища. В окремих випадках вони носять катастрофічний характер для навколишнього природного середовища та населення.

Стихійні явища, як правило, виникають у комплексі, що значно посилює їх негативний вплив. Небезпечні природні явища, в основному, визначаються проявом трьох головних груп факторів – ендегенних, екзогенних та гідрометеорологічних процесів.

Стихійні лиха, що мають місце на території України, можна поділити на прості, що включають один елемент, наприклад, сильний вітер, зсув або землетрус, та складні, що включають декілька одночасно діючих процесів однієї групи або кількох груп, наприклад, негативних атмосферних та геодинамічних екзогенних процесів, ендегенних, екзогенних та гідрометеорологічних процесів у поєднанні з техногенними.

Аварії природного характеру класифікуються за такими основними ознаками:

- за масштабами наслідків відповідно до територіального поширення;
- за розмірами заподіяних (очікуваних) економічних збитків та людських втрат;
- за кваліфікаційними ознаками надзвичайних ситуацій.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз основних складових бездротової зарядки для акумулятора, враховуючи рівні потужності, що варіюються від мкВт у бездротових сенсорних мережах до сотень кВт у залізнодорожному транспорті. Особливу увагу приділено електричним та магнітним колам індуктивних систем передачі енергії.
2. Проведено теоретичне дослідження конструктивних особливостей котушок й інших елементів магнітного кола системи безпроводної передачі енергії.
3. Розроблена система безпроводної передачі енергії для зарядки акумулятора на електричному транспортному засобі – E-Bike. Рівень потужності заряду коливається від 100 Вт до 250 Вт. Навантаженням служить акумулятор LiFePO<sub>4</sub> на напругу 36 В та ємністю 10 А·год.
4. Запропоновано алгоритм підвищення енергоефективності передачі енергії та продемонстровано результати моделювання, які збігаються із результатами розрахунків по запропонованій методиці.
5. Досліджено альтернативні варіанти котушок побудованих за DD системою з метою встановлення найкращої конструкції з точки зору ефективності системи та стійкості до просторових зміщень між котушками.
6. Проведено дослідження зміни взаємоіндукції, в залежності від взаємного розташування котушок та при різних повітряних зазорах, за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення – 3D-магнітного симулятора. Встановлено, що найменш чутливі до цих змін котушки побудовані за DD системою.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 25–26 листоп. 2020.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2020. – С. 111.
2. V. Boscaino, F. Pellitteri, L. R. R., and C. G., “Wireless battery chargers for portable applications: design and test of a high-efficiency power receiver,” *IET Power Electronics*, vol. 6, pp. 20–29, 2013.
3. S. Segan. (2015) First Look at Intel’s Laptop Wireless Charging. [Online]. Available: <http://www.pcmag.com/article2/0,2817,2490600,00.asp>.
4. H. Z. Z. Beh, G. A. Covic, and J. T. Boys, “Wireless Fleet Charging System for Electric Bicycles,” *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of*, vol. 3, no. 1, pp. 75–86, Mar. 2015.
5. S. Asheer, A. Al-Marawani, T. Khattab, and A. Massoud, “Inductive power transfer with wireless communication system for electric vehicles,” in *GCC Conference and Exhibition (GCC), 2013 7th IEEE*, 2013, pp. 517–522.
6. G. Jung, B. Song, S. Shin, S. Lee, J. Shin, Y. Kim, C. Lee, and S. Jung, “Wireless charging system for On-Line Electric Bus(OLEB) with series-connected road-embedded segment,” in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on*, 2013, pp. 485–488.
7. Y. Shi, L. Xie, Y. T. Hou, and H. D. Sherali, “On renewable sensor networks with wireless energy transfer,” in *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, 2011, pp. 1350–1358.
8. J. Li, P. Li, H. Liu, D. Li, and J. Tang, “A contactless battery charging and monitoring system for wireless sensor network nodes,” in *Computer*

- Science and Network Technology (ICCSNT), 2011 International Conference on, 2011, vol. 3, pp. 1923–1926.
9. R. W. Porto, V. J. Brusamarello, I. Muller, and F. R. de Sousa, “Design and characterization of a power transfer inductive link for wireless sensor network nodes,” in Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2015 IEEE International, 2015, pp. 1261–1266.
  10. C. Park and P. H. Chou, “AmbiMax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes,” in Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006. SECON '06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on, 2006, vol. 1, pp. 168–177.
  11. J. G. Taiber (2014). Advances in wireless charging of electrified vehicles and need for standardization. [Online]. Available: [http://sites.ieee.org/isgt2014/files/2014/03/Day3\\_Panel3B2\\_Taiber.pdf](http://sites.ieee.org/isgt2014/files/2014/03/Day3_Panel3B2_Taiber.pdf).
  12. H. Z. Z. Beh, G. A. Covic, and J. T. Boys, “Investigation of Magnetic Couplers in Bicycle Kickstands for Wireless Charging of Electric Bicycles,” Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of, vol. 3, no. 1, pp. 87–100, Mar. 2015.
  13. J.-I. Itoh, K. Noguchi, and K. Orikiawa, “System design of electric assisted bicycle using EDLCs and wireless charger,” in Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 – ECCE-ASIA), 2014 International, 2014, pp. 2277–2284.
  14. S. Raabe, G. A. Covic, J. T. Boys, C. Pennalligen, and P. Shekar, “Practical considerations in the design of multiphase pick-ups for contactless power transfer systems,” in Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, 2009, pp. 753–758.
  15. G. A. Covic, M. L. G. Kissin, D. Kacprzak, N. Clausen, and H. Hao, “A bipolar primary pad topology for EV stationary charging and highway power by inductive coupling,” in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011, pp. 1832–1838.



16. U. K. Madawala, M. Neath, and D. J. Thrimawithana, "A Power Frequency Controller for Bidirectional Inductive Power Transfer Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 1, pp. 310–317, Jan. 2013.
17. D. J. Thrimawithana, U. K. Madawala, and M. Neath, "A steady-state analysis of bi-directional inductive power transfer systems," in *Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on*, 2013, pp. 1618–1623.
18. X. Xie, K. Zhou, L. Gao, X. Dai, Z.-H. Wang, and J. Gao, "Study on dynamical control of bi-directional Inductive Power Transfer system," in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on*, 2013, pp. 1244–1247.
19. Y. J. Jang, Y. D. Ko, and S. Jeong, "Optimal design of the wireless charging electric vehicle," in *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International*, 2012, pp. 1–5.
20. M. Li, Q. Chen, J. Hou, W. Chen, and X. Ruan, "8-Type contactless transformer applied in railway inductive power transfer system," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE*, 2013, pp. 2233–2238.
21. S. B. Lee, S. Ahn, J. H. Lee, and I. G. Jang, "Optimization of the wireless power transfer system in an electric railway," in *Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2014 IEEE*, 2014, pp. 158-161.
22. <http://primove.bombardier.com/>.
23. T. Diekhans and R. W. De Doncker, "A dual-side controlled inductive power transfer system optimized for large coupling factor variations," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE*, 2014, pp. 652659
24. U. K. Madawala and D. J. Thrimawithana, "A ring inductive power transfer system," in *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 667-672.

- 25.L. Gao, S. Liu, and R. A. Dougal, "Dynamic lithium-ion battery model for system simulation," *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 3, pp. 495-505, Sep. 2002.
- 26.M. Chen and G. A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, Jun. 2006.
- 27.L. W. Yao and J. A. Aziz, "High capacity lifepo4 battery model with consideration of nonlinear capacity effects," in *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International*, 2012, vol. 1, pp. 182187/
- 28.E. Kamal, A. El Hajjaji, and A. M. Mabwe, "State of charge estimation based on extended Kalman filter algorithm for Lithium-Ion battery," in *Control and Automation (MED), 2015 23th Mediterranean Conference on*, 2015, pp. 734739.
- 29.Z. Zhu, J. Sun, and D. Liu, "Online state of charge EKF estimation for LiFePO4 battery management systems," in *Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS), 2012 International Symposium on*, 2012, pp.609-614.
- 30.T. Imura and Y. Hori, "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 10, pp. 4746-4752, Oct. 2011.
- 31.S. Valtchev, B. Borges, K. Brandisky, and J. B. Klaassens, "Resonant Contactless Energy Transfer With Improved Efficiency," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 3, pp. 685-699, Mar. 2009.
- 32.S. Kong, M. Kim, K. Koo, S. Ahn, B. Bae, and J. Kim, "Analytical expressions for maximum transferred power in wireless power transfer systems," in *Electromagnetic Compatibility (EMC), 2011 IEEE International Symposium on*, 2011, pp. 379-383.

- 33.N. Inagaki, "Theory of Image Impedance Matching for Inductively Coupled Power Transfer Systems," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 4, pp. 901-908, Apr. 2014.
- 34.C.-S. Wang, G. A. Covic, and O. H. Stielau, "Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 1, pp. 148-157, 2004.
- 35.C.-B. Park and H.-W. Lee, "Study on the Optimal Switching Frequency for Maximum Wireless Power Transfer in a Variable Airgap System," *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of*, vol. 3, no. 1, pp. 201-204, Mar. 2015.
- 36.M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 11, pp. 3096-3108, Nov. 2011.
- 37.M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Design and optimisation of magnetic structures for lumped Inductive Power Transfer systems," in *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE, 2009*, pp. 2081-2088.
- 38.M. Chigira, Y. Nagatsuka, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, and A. Suzuki, "Small-size light-weight transformer with new core structure for contactless electric vehicle power transfer system," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011*, pp. 260-266.
- 39.M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and C.-Y. Huang, "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 1, pp. 318-328, Jan. 2013
- 40.S. Hasanzadeh, S. Vaez-Zadeh, and A. H. Isfahani, "Optimization of a Contactless Power Transfer System for Electric Vehicles," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 8, pp. 3566-3573, 2012.

41. J. Sallan, J. L. Villa, A. Llombart, and J. F. Sanz, "Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 6, pp. 2140-2149, 2009.
42. J. T. Boys, G. A. Covic, and A. W. Green, "Stability and control of inductively coupled power transfer systems," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, vol. 147, no. 1, pp. 37-43, Jan. 2000.
43. R. Bosshard, U. Badstubner, J. W. Kolar, and I. Stevanovic, "Comparative evaluation of control methods for Inductive Power Transfer," in *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
44. W. P. Choi, W. C. Ho, X. Liu, and S. Y. R. Hui, "Comparative study on power conversion methods for wireless battery charging platform," in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International*, 2010, pp. S15—9—S15—16.
45. C. Zhao, Z. Wang, J. Du, J. Wu, S. Zong, and X. He, "Active resonance wireless power transfer system using phase shift control strategy," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE*, 2014, pp. 1336-1341.
46. C.-Y. Huang, J. T. Boys, G. A. Covic, and M. Budhia, "Practical considerations for designing IPT system for EV battery charging," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*, 2009, pp. 402407.
47. F. Pellitteri, V. Boscaino, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, and G. Capponi, "Experimental test on a Contactless Power Transfer system," in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014 Ninth International Conference on*, 2014, pp. 1-6.
48. Open Source Software 'Finite Element Method Magnetics', FEMM – Version 4.2, 2009.
49. Software 'Powersim Studio', PSIM Studio – Version 9.1, Powersim Inc., 2012.

50. В. Ц. Жидецький, В. С. Джигирей, О. В. Мельников. Основи охорони праці. — Вид. 2-е, стереотипне. — Львів: Афіша, 2000. — 348 с.
51. Стеблюк М.І. Цивільна оборона. К.: Знання, 2006. — 487 с.