

Віктор Шевченко, Богдан Пахалюк, Олександр Гусев

ОГЛЯД ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОЇ ЗАРЯДКИ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ МАЛОПОТУЖНИХ СИСТЕМ

Актуальність теми дослідження. Розробка нових топологій, методів розрахунку та оптимізації напівпровідникових перетворювачів для систем БПЕ дозволить підвищити передану бездротовим способом електричну енергію, розширити діапазон регулювання частоти, що зменшить витрати часу на підзарядку акумуляторів електротранспорту та підвищить зручність використання систем БПЕ за рахунок зниження чутливості до точного позиціонування приймальних і передавальних елементів, що стане передумовою більш активного впровадження електромобілів та електротранспорту. В умовах різної екологічної, демографічної, економічної ситуації у світі все більшого поширення набуває індивідуальний електротранспорт.

Вирішення поставлених завдань створить передумови для впровадження БПЕ в багатьох сферах суспільства як України, так і світу загалом (приватний транспорт, військова техніка та обладнання, побутова електроніка тощо).

Постановка проблеми. Нині методи бездротової передачі енергії (БПЕ), засновані на явищах електростатичної та електромагнітної індукції, набувають значного поширення в різноманітних застосуваннях. Метод БПЕ сьогодні широко використовується в малопотужних системах – бездротові зарядки мобільних телефонів, бритв, зубних щіток, малопотужних транспортних засобів.

Основні обмеження таких систем полягають у низькій ефективності при великій відстані передачі та відносно великих масогабаритних параметрах елементів, що у свою чергу призводить до високої собівартості систем БПЕ. Останнім часом з'являється все більше споживачів, які потребують передачі безконтактним способом електричної енергії від одиниць кіловат і вище.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз стану досліджень показує, що тематика досліджень, присвячених вдосконаленню систем бездротової зарядки, постійно розширюється і є надзвичайно актуальною, зокрема, за кордоном. Особливо, враховуючи розвиток електромобілів, зростає інтерес до бездротової зарядки транспортних засобів. Також є рішення індуктивних системи передачі енергії для приладів низької напруги середньої та високої потужності.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Якщо статичній та динамічній зарядці електрокарів присвячено чимало статей і розробок, то індивідуальним засобам пересування приділено менше уваги, отже, проектуванню низьковольтної бездротової зарядки для електровелосипедів, електроскутерів, велособілів є перспективним напрямком дослідження. Сучасні дослідження спрямовані саме на досягнення зниження собівартості та підвищення ефективності систем бездротової зарядки подібних транспортних засобів.

Постановка завдання. Основними завданнями є огляд та порівняння існуючих топологій, методів розрахунку та напрямки оптимізації систем БПЕ.

Викладення основного матеріалу. У першій частині статті розглянуто загальні відомості про принципи дії і застосування ємнісного та індуктивного способу бездротової передачі енергії, наведено переваги та недоліки, ефективність. Акцентовано увагу на магнітно-резонансному зв'язку, розглянуто основні компенсаційні топології. Побудовано графіки залежності передавальної функції БПЕ від частоти для послідовно-послідовної схеми резонансу. Особливо представлено ймовірну залежність від відстані між передавачем та приймачем.

У другій частині статті зроблено аналіз існуючих силових напівпровідникових топологій БПЕ на основі індуктивного зв'язку та різних компенсаційних топологій. Спочатку аналізуються індуктивні системи передачі енергії для приладів низької напруги високої потужності. Топології первинних та вторинних dc-dc перетворювачів відбираються та порівнюються з погляду необхідної номінальної потужності та ефективності. Проаналізовано систему БПЕ на основі інвертору струму та компенсаційної резонансної PS-топології для електричних транспортних засобів та пристроїв для заряджання акумулятора. Розглянута цікава стаття, де проаналізовано та порівняно запропонований бортовий зарядний пристрій електричного транспортного засобу на базі імідансної ланки зі звичайним БЗП. Далі представлено варіант топології та економічно ефективною конструкції антен для передачі бездротової енергії в електричних скутерах. Крім суто схематичних рішень, розглянуто інші рішення у сфері силових електроніки, які поліпшують ефективність бездротової передачі електроенергії. Представлено новий високоефективний планарний підхід до об'єднання всіх магнітних компонентів первинно-паралельного ізольованого підсилюючого перетворювача у структуру форми E-I-E-core (планарний інтегрований магнетик – planar integrated magnetic – PIM).

Висновки. У статті виконаний огляд основних технологій бездротової зарядки накопичувачів енергії для малопотужних систем. Було виявлено, що індуктивний спосіб передачі енергії є найбільш ефективним на цей момент. Водночас слід відзначити, що при збільшенні відстані передачі ефективність значно падає. Покращення геометрії магнітних компонентів є основним напрямком дослідження в цьому напрямку. Основні топологічні рішення схем силових електроніки зводяться до реалізації чотирьох основних способів компенсації для отримання синусоїдальної напруги. Тобто для різних задач обираються різні топології з тими чи іншими модифікаціями, залежно, передусім, від потужності, яку потрібно передати та навантаження. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на зменшення кількості напівпровідників та альтернативним способом реалізації компенсації.

Ключові слова: бездротова передача енергії; магнітно-резонансний зв'язок; компенсаційна топологія; бортовий зарядний пристрій; високочастотний інвертор.

Рис.: 8. Бібл.: 25.

Постановка проблеми. Методи бездротової передачі енергії (БПЕ), засновані на явищах електростатичної та електромагнітної індукції, набувають значного поширення в різноманітних застосуваннях. Метод БПЕ є однією із ключових технологій майбутнього

ого, хоча і відомий з кінця XIX сторіччя (досліди Н. Тесла), і сьогодні широко використовується в малопотужних системах – бездротові зарядки мобільних телефонів, бритв, зубних щіток, малопотужних транспортних засобів.

Основні обмеження таких систем полягають у низькій ефективності при великій відстані передачі та відносно великих масогабаритних параметрах елементів, що у свою чергу призводить до високої собівартості систем БПЕ. Останнім часом з'являється все більше споживачів, які потребують передачі безконтактним способом електричної енергії від одиниць кіловат і вище, зокрема для підзарядки акумуляторів електромобілів, одночасної підзарядки акумуляторів портативних пристроїв військового застосування (дрони, радіостанції тощо), живлення елементів промислових систем автоматизації та робототехніки.

З іншого боку, вартість акумуляторних батарей є іншою важливою складовою собівартості таких систем. Через складність реалізації високоефективної системи на відносно низьких напругах, дешеві низьковольтні батареї практично не використовуються. Водночас високовольтні батареї є більш складними та дорогими в обслуговуванні.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз стану досліджень показує, що тематика досліджень, присвячених вдосконаленню систем бездротової зарядки, постійно розширюється і є надзвичайно актуальною, зокрема, за кордоном [1–5]. Особливо, враховуючи розвиток електромобілів, зростає інтерес до бездротової зарядки транспортних засобів. Відомі аналоги таких систем. Разом з тим широкому впровадженню заважає недосконалість технологій та висока собівартість таких систем. Якщо статичній та динамічній зарядці електрокарів присвячено чимало статей і розробок, то індивідуальним засобам пересування приділено менше уваги, отже, проектування низьковольтної бездротової зарядки для електровелосипедів, електроскутерів, веломобілів є перспективним напрямком дослідження. Сучасні дослідження спрямовані саме на досягнення зниження собівартості та підвищення ефективності систем бездротової зарядки подібних транспортних засобів.

Мета статті. Основною метою статті є огляд існуючих топологій, методів розрахунку та напрямки оптимізації систем БПЕ.

Загальні відомості про застосування індуктивного та ємнісного способу бездротової передачі електроенергії.

З-поміж основних способів бездротової передачі енергії (мікрохвильове й оптичне випромінювання, методи електричної провідності, електростатичної та електромагнітної індукції) найбільше практичне поширення і застосування отримали методи електростатичної та електромагнітної індукції.

Метод електростатичної індукції. Метод був уперше застосований Н. Теслою для живлення бездротових ламп по повітря. Електростатичний або ємнісний зв'язок являє собою проходження електроенергії через діелектрик. На практиці це градієнт електричного поля або диференціальна ємність між двома або більше ізольованими клемми, пластинами, електродами або вузлами, що підносяться над провідною поверхнею. Електричне поле створюється за рахунок заряду пластин змінним струмом високої частоти і високого потенціалу. Ємність між двома електродами і живлячим пристроєм утворює різницю потенціалів. Електрична енергія, що передається за допомогою електростатичної індукції, може бути використана у приймальному пристрої, наприклад, такому як бездротові лампи. Тесла продемонстрував бездротове живлення ламп освітлення енергією, переданою змінним електричним полем. У майбутньому планується, що пристрої будуть отримувати енергію з повітря, за допомогою передавального терміналу.

Цей спосіб має більшу відстань передачі, аніж у методі електромагнітної індукції, однак нижчу ефективність і потужність передачі [6]. Переважна більшість робіт вітчизняних учених присвячена БПЕ на основі саме ємнісного зв'язку [7–9].

Метод електромагнітної індукції (індуктивний зв'язок). При бездротовій передачі енергії методом електромагнітної індукції використовується ближнє електромагнітне поле. Завдяки електродинамічній індукції, змінний електричний струм, що протікає через первинну обмотку, створює змінне магнітне поле, яке діє на вторинну обмотку, індукуючи в ній електричний струм. Для досягнення високої ефективності взаємодія має бути досить тісною. При віддаленні вторинної обмотки від первинної все більша частина магнітного поля не досягає вторинної обмотки й індуктивний зв'язок стає все більш неефективним через втрати.

Повітряний трансформатор є найпростішим пристроєм для бездротової передачі енергії. Первинна і вторинна обмотки трансформатора прямо не пов'язані. Передача енергії здійснюється за допомогою процесу, відомого як взаємна індукція. Основною функцією трансформатора є збільшення або зменшення первинної напруги. Основним недоліком цього методу бездротової передачі є дуже невелика відстань його дії. Приймач повинен перебувати в безпосередній близькості до передавача для того, щоб ефективно з ним взаємодіяти.

Найпростіша топологія із чисто індуктивним зв'язком та компенсуючими конденсаторами представлена на рис. 1, а. За допомогою конденсаторів, що утворюють резонансні контури, збільшується ефективність передачі.

Еквівалентні схеми заміщення спарених індуктивностей представлені на рис. 1, б та 1, в. На першій схемі (рис. 1, б) спарені індуктивності представлені через самоіндуктивності L_1 , L_2 та взаємоіндуктивність M . У другому варіанті схеми заміщення індуктивності представлені ідеалізованим трансформатором, індуктивністю намагнічування та індуктивністю розсіювання. При цьому ці параметри напряму виражаються через параметри в попередній схемі. R_1 , R_2 – активні опори, враховують омичні втрати первинного та вторинного кіл; L_1-M , L_2-M – індуктивності розсіювання основного потоку в обмотках первинного та вторинного кіл. Взаємоіндукція виражає індуктивність намагнічування.

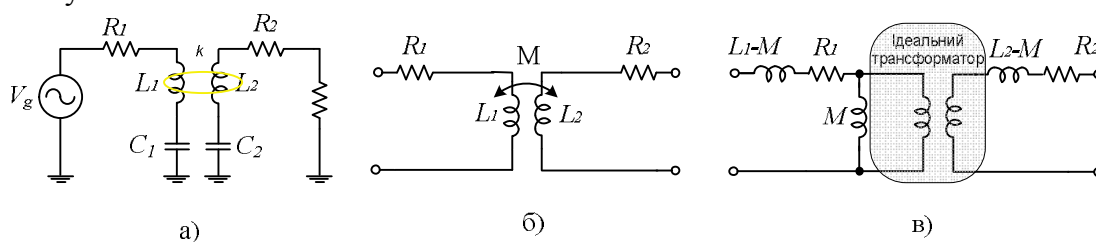


Рис. 1. Резонансний спосіб БПЕ:

а – схема індуктивного резонансного способу БПЕ; б – топологія БПЕ з індуктивним зв'язком; в – схема заміщення спарених індуктивностей

Системи з виключно індуктивним зв'язком мають ефективність значно нижчу за системи із магнітно-резонансним зв'язком. Великий повітряний розрив трансформатора збільшує витік потоку Φ , як наслідок, призводить до вищої індуктивності витіку в порівнянні зі звичайними трансформаторами. Ефективність та потужність ППЕ, як правило, не перевищують 50 % [10]. Використання резонансу дещо збільшує дальність передачі [11]. При резонансній індукції передавач і приймач налаштовані на одну частоту. Таким чином, значна потужність може бути передана між двома взаємно налаштованими LC-ланцюгами з відносно невисоким коефіцієнтом зв'язку k .

Асоціація споживачів електроніки класифікує технології бездротових зарядних пристроїв за величиною коефіцієнта зв'язку контурів [12]. При значенні коефіцієнта зв'язку

до 0,1 система називається слабозв'язаною, а якщо коефіцієнт наближається до 1, то це сильнозв'язана система. Сильнозв'язані системи називаються магнітно-індуктивними, а слабозв'язані – магнітно-резонансними.

Магнітно-резонансна технологія менш критична до взаємного розташування котушок, і з одним передавачем може працювати одразу кілька приймачів, тобто один зарядний пристрій може заряджати кілька пристроїв. Крім того, у магнітно-резонансних системах, з налаштованими в резонанс котушками зменшення ККД при збільшенні відстані між котушками відбувається повільніше в порівнянні з індуктивними системами. Вищеперелічені факти було доведено зокрема у процесі глибокого аналізу в роботі [13]. Ще більша перевага в ефективності магнітно-резонансних систем досягається, коли первинна і вторинна котушка мають різні розміри. У цьому випадку одну первинну котушку можна використовувати для зарядки декількох пристроїв одночасно [14].

Згідно з рекомендаціями стандартів [12], заснованих на технології магнітної індуктивності, резонансна частота вибирається з урахуванням навантаження і може змінюватися в досить широкому діапазоні. У зв'язку з цим ефективна добротність системи відносно низька порівняно з рішеннями на базі технології магнітного резонансу. Оптимальна ефективність системи може бути досягнута тільки на певній резонансній частоті і при оптимальному опорі навантаження. У разі використання магнітно-резонансної технології енергія передається на строго визначеній резонансній частоті, отже, добротність системи вище, але потрібне дуже точне узгодження резонансних частот.

Передавальна і приймальна котушки, як правило, являють собою одношарові соленоїди або плоску спіраль з набором конденсаторів, які дозволяють налаштувати приймальний елемент на частоту передавача.

Існує 4 базові компенсаційні топології (рис. 2), на основі яких створюється переважна більшість напівпровідникових рішень: послідовно-послідовні (SS), послідовно-паралельні (SP), паралельно-послідовні (PS) та паралельно-паралельні (PP).

Під час аналізу застосування існуючих топологій було виявлено, що найменш часто використовується схема із паралельно-послідовним (PS) включенням (рис. 2, з). Як виняток, можна навести випадок при передачі енергії від сонячних панелей, тобто при специфічних вхідних параметрах, які забезпечують ВАХ панелей [15].

Загальна схема на основі PS топології забезпечує м'яке перемикання всіх напівпровідникових пристроїв. Тобто у деяких окремих випадках ця топологія може бути найкращим рішенням.

У паралельно-паралельній топології (PP) індуктивної БПЕ з резонансним перетворювачем (рис. 2, б), конденсатори паралельно розташовані на вході та виході схеми.

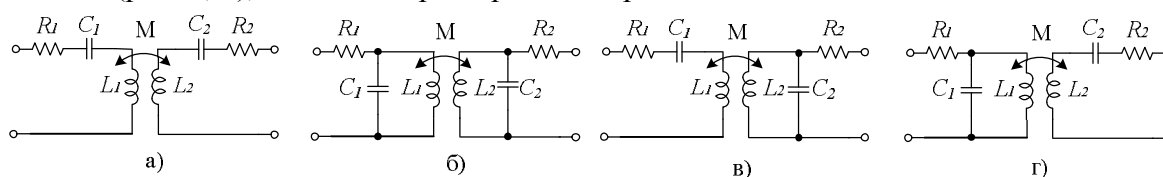


Рис. 2. Компенсаційні топології ІПЕ: а – послідовно-послідовна (SS); б – паралельно-паралельна (PP); в – послідовно-паралельна (SP); г – паралельно-послідовна (PS)

Згідно з дослідженнями [16] паралельно-паралельна топологія має дещо більші переваги при значному навантаженні, в інших випадках в послідовно-послідовній топології буде більша ефективність. Сюди ж варто додати, що паралельна топологія на стороні приймача є кращим рішенням при деяких навантаженнях.

У послідовно-послідовній (SS) топології конденсатори послідовно розташовані на первинній та вторинній стороні, як показано на рис. 2, а. Основною метою цієї конфі-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

гурації є усунення індуктивності витоків [10]. Передана потужність на частоті резонансу не залежить від опору навантаження і ККД на цьому етапі є максимальним.

У [5] описано такі висновки щодо порівнянь топологій. Порівнюючи SS з параметрами SP (рис. 2, в), можна побачити, що вибір топології сильно впливає на вибір первинної ємності. Важливою перевагою послідовно-послідовної топології є те, що первинна ємність не залежить як від коефіцієнта магнітного зв'язку, так і від навантаження. Натомість послідовно-паралельна топологія залежить від коефіцієнта зв'язку і вимагає більшого значення ємності для сильного магнітного зв'язку.

У таких приладах, як зарядні пристрої для акумулятора, навантаження постійно змінюється. Якщо підсилення напруги робочої точки чутливе до значення навантаження, тоді напруга навантаження змінюється протягом процесу заряджання. Порівняння частотного аналізу перетворювачів на основі SS-топології та PP-топології показує, що SS є найкращою топологією для зарядних пристроїв електричних машин [10].

Тобто для різних задач обираються різні топології з тими чи іншими модифікаціями, залежно від потужності, яку потрібно передати в навантаження.

Основне обмеження індуктивної передачі енергії полягає в коефіцієнті магнітного зв'язку, добротності резонансного контуру та ефективності силового перетворювача. Окремо слід відзначити, що ефективність такої системи сильно залежить від частоти резонансного контуру, яка має збігатися з частотою комутації напівпровідникових ключів. Вирішення цієї проблеми зводиться до використання складних систем зворотного зв'язку і налаштування частоти комутації. Саме ці проблеми обмежують широке впровадження таких систем. Відповідно, основні подальші вдосконалення існуючих рішень полягатимуть в оптимізації магнітних компонентів і силового перетворювача електроенергії.

На рис. 3, а наведено приклад залежності передавальної функції БПЕ від частоти для послідовно-послідовної схеми резонансу. Окремо представлена типова залежність індуктивного зв'язку від відстані між передавачем та приймачем (рис. 3, б). З експоненційного характеру залежності можна зробити висновок, що ефективність системи значною мірою залежить від відстані між передавачем та приймачем. Залежність передавальної характеристики від відстані є одним з ключових факторів доцільності синхронізації передавальної і приймальної частин та підстройки частоти.

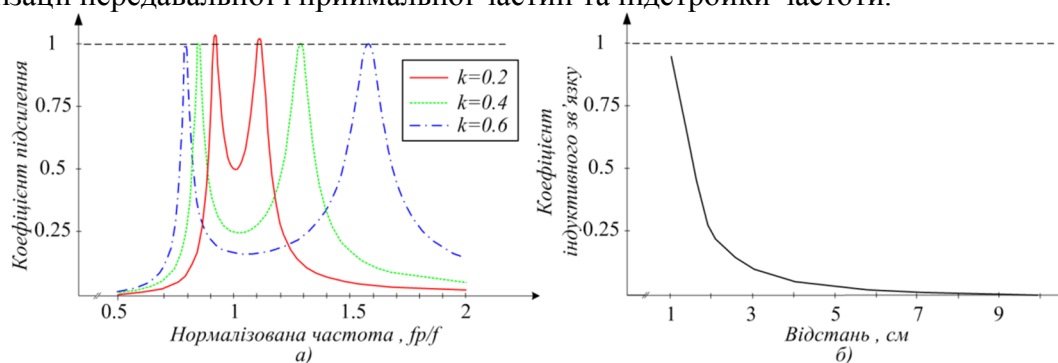


Рис. 3. Залежності: а – передавальної функції БПЕ від частоти;
б – індуктивного зв'язку від відстані

Резонансна електродинамічна індукція застосовується для зарядки акумуляторних батарей портативних пристроїв, таких як портативні комп'ютери і стільникові телефони, медичні імплантати й електромобілі. Техніка локалізованої зарядки використовує вибір відповідної передавальної котушки у структурі масиву багат шарових обмоток. Резонанс використовується як у панелі бездротової зарядки (передавальному контуру), так і в модулі приймача (вбудованого в навантаження) для забезпечення максимальної ефективності передачі енергії. Така техніка передачі підходить універсальним бездротовим зарядним панелям для підзарядки портативної електроніки, такої, наприклад, як мобільні телефони. Техніка прийнята як частина стандарту бездротової зарядки Qi [14].

Зарядка низьковольтних накопичувачів енергії по безпроводному інтерфейсу є одним з останніх технологічних досягнень, що набувають масового характеру. Розвиток технології безпроводної зарядки є одним з пріоритетних напрямків досліджень провідних світових лабораторій із силової електроніки.

У силу більшої мобільності і компактності електровелосипедів, електроскутерів, електромобілів, порівняно із класичною дротовою системою зарядки виникає менше труднощів. Однак багато електромобілів та транспорту із потужністю системи менше 20 кВт (наприклад, підйомники, навантажувачі для внутрішнього промислового транспорту, індивідуальний електротранспорт) працюють від свинцево-кислотних батарей з напругою 12, 24, 48, 60 або 96 В. Через низьку напругу батареї вони характеризуються великими струмами зарядки та розрядження, тому непросто досягти високої ефективності такої системи. При успішному вирішенні цієї проблеми це може допомогти зменшити простір на обслуговування транспортних засобів та підвищити доступність, що важливо, особливо у промисловості.

Аналіз існуючих напівпровідникових топологій бездротової передачі енергії на основі індуктивного зв'язку.

Головним завданням є реалізація однієї з еквівалентних схем (рис. 2). Це можна зробити за допомогою напівпровідникових перетворювачів. Далі представлено декілька силових напівпровідникових топологій БПЕ.

У дослідженнях [17; 18] аналізуються індуктивні системи передачі енергії для приладів низької напруги високої потужності. Тому топології первинних та вторинних dc-dc перетворювачів відбираються та порівнюються з погляду необхідної номінальної потужності та ефективності. Аналіз проводиться для системи БПЕ з вхідною напругою 400 В, напругою акумулятора 24 В та номінальною вихідною потужністю 6 кВт. Схема реалізована на послідовно-послідовній топології БПЕ.

Силова електроніка в системах індуктивної БПЕ повинна виконувати 3 основні функції:

1. Передачі енергії між первинною та вторинною сторонами.
2. Управління передачею енергії під впливом зміни вхідних і вихідних параметрів.
3. Зробити систему максимально ефективною.

На рис. 4, а високочастотний інвертор (ВІ) перетворює первинну напругу постійного струму в напругу змінного струму з високою частотою, тим самим забезпечуючи передачу енергії на вторинну сторону. У цій простій конфігурації ВІ може також використовуватися для керування вихідною потужністю системи, змінюючи робочий цикл. Проте ефективність такого методу може бути знівельована від високих втрат у ВІ внаслідок жорстких умов перемикавання.

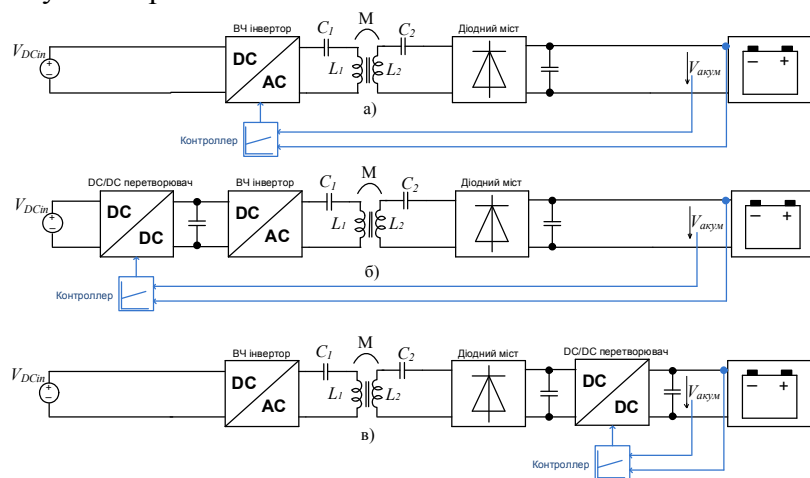


Рис. 4. Послідовні топології зі схемою контролю вихідної потужності:
а – без DC/DC перетворювача; б – із первинним DC/DC перетворювачем;
в – із вторинним DC/DC перетворювачем

Інші варіанти показані на рис. 4, б та 4, в, де додатковий dc-dc перетворювач встановлюється або на первинну сторону, як у [18], або на вторинній стороні [17; 18] для керування передачею енергії. Як наслідок, ВІ може працювати майже з м'яким перемиканням, що підвищує ефективність. Що стосується вибору правильної топології для низької напруги, то третій варіант має деякі помітні переваги. Через те, що напруга системи від'єднана від напруги акумулятора dc-dc перетворювачем, у резонансному ланцюзі та випрямлячі можна уникнути високих струмів у діапазоні струму зарядки (від 200 до 250 А на 6 кВт), що призводить до зниження втрат провідності. Електрична схема показана на рис. 5. Крім того, на відміну від інших топологій, ніякого зв'язку через повітряний зазор для керування вихідною потужністю не потрібно. Через вищенаведені переваги топологія з вторинним перетворенням є перспективним рішенням [17; 18]. Інші варіанти є менш доцільними і доступними через високу складність керування.

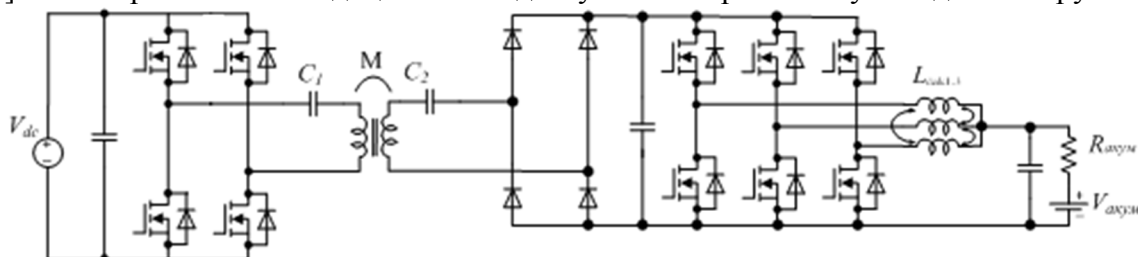


Рис. 5. Схема силової топології для системи ППЕ для низьковольтних високотужних застосувань

ВІ реалізується у повномостовій конфігурації, оскільки це найпоширеніша топологія, що використовується у багатьох рішеннях з найбільшою ефективністю. На вторинній стороні діодний випрямляч використовується для перетворення напруги від змінного струму до постійного струму. Можливий варіант використання топології активного випрямляча. У пристроях з низькою напругою для підвищення ефективності можуть використовуватись багатофазні dc-dc перетворювачі з чергуванням фаз і спареними індуктивностями [10]. Індуктивність визначається так, щоб максимальна пульсація фазового струму становила 30 % від загального номінального вихідного струму.

Показано в багатьох роботах, що топологія з вторинним dc-dc перетворенням має переваги в тому, що вона є більш збалансованою, досягає вищої ефективності та відсутній зв'язок між первинною та вторинною сторонами для керування вихідною потужністю. Також виявлено, що випрямляч та dc-dc перетворювач забезпечують більшість втрат потужності в системі БПЕ. Хоча навіть у такому випадку ефективність між 89,0 і 94,2 % може бути досягнута в будь-якій точці експлуатації для часткового та повного завантаження прототипу, побудованого в лабораторії.

У статті [15] проаналізовано систему БПЕ на основі інвертора струму та компенсаційної резонансної PS-топології для електричних транспортних засобів та пристроїв для заряджання акумулятора. Розроблено лабораторний прототип 420 Вт, максимальна ефективність етапу WPT DC-DC, близька до 90 %, а коефіцієнт зчеплення – 18 %. Вхідна індуктивність L_d на загальній схемі (рис. 6) у цій статті обмежує струм короткого замикання через напівпровідникові прилади та котушки. Це є важливою особливістю цієї топології. Метою послідовних діодів (D1-D2') є запобігання зворотного струму. Наприклад, коли включені транзистори S1 і S2, і якщо напруга на C1 негативна, то C1 буде короткозамкненим через S2'-D2. Однак, якщо вихідна напруга та струм інвертора перебувають у тій же фазі, то немає потреби в цих діодах. Проте на практиці параметри ланцюга і взаємні індуктивності змінюються, отже, коефіцієнт потужності відхиляється від одиниці.

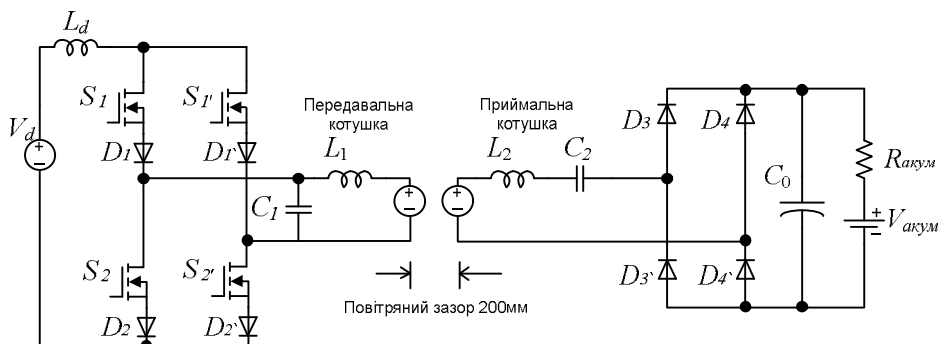


Рис. 6. БПЕ (DC-DC перетворення) із використанням повномостового перетворювача струму

Щодо оптимізації схеми, то було відзначено, що зворотні блокуючі ізольовані вхідні біполярні транзистори (RV-IGBT) могли б усунути використання діодів, що обов'язкові при застосуванні транзисторів MOSFET. Однак нині RV-IGBT в основному тільки розробляються і недоступні широкому колу користувачів. Послідовно з'єднаний конденсатор C_2 потрібен для досягнення бажаного резонансу в котушці приймача. Таким чином, компенсується велике падіння напруги за рахунок індуктивності котушки приймача L_2 .

Здебільшого додаткова індуктивність на вході може бути не найкращим рішенням. Проте в конкретному випадку, при специфічних вхідних параметрах, які забезпечують, наприклад, ВАХ сонячних панелей, ця топологія може бути більш вигідною.

Цікава топологія розглянута у статті [19]. У цій роботі проаналізовано та порівняно запропонований бортовий зарядний пристрій електричного транспортного засобу (БЗП) на базі імпедансної ланки зі звичайним БЗП (рис. 7, б). Завдяки імпедансній ланці, інвертор одночасно регулює вихідну напругу системи без додавання додаткових напівпровідникових перетворювачів (рис. 7, а).

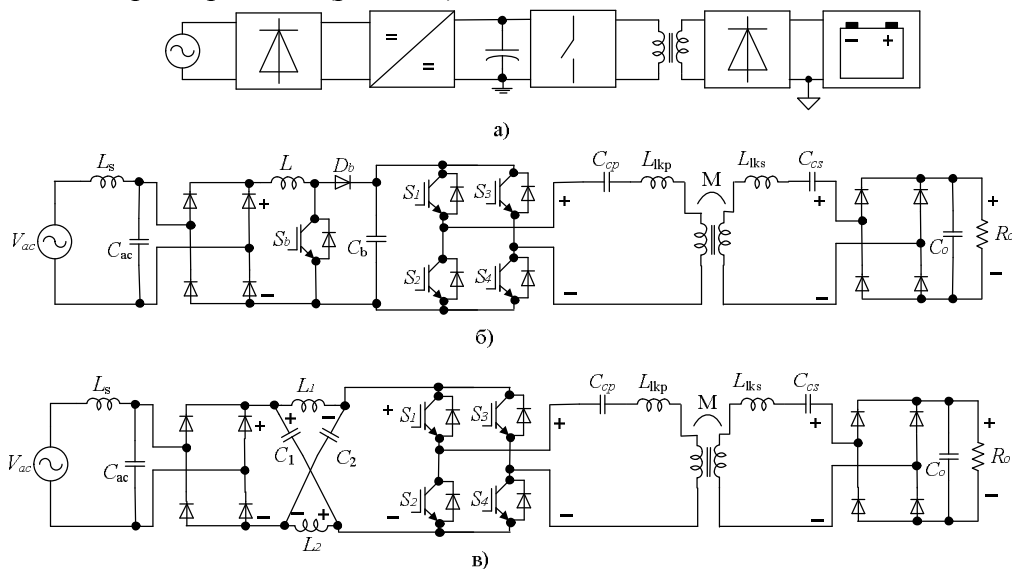


Рис. 7. Схеми бездротового зарядного пристрою: а – структурна схема звичайного БЗП; б – типовий підвищуючий перетворювач в БЗП; в – запропонований БЗП на основі імпедансної ланки

Незважаючи на те, що імпедансна ланка зменшує кількість силових напівпровідників у системі, спостерігається збільшення кількості пасивних компонентів порівняно з підвищуючим перетворювачем. Головний недолік цього факту полягає в тому, що пер-

винна частина системи може мати більший розмір і вагу. Детальний аналіз та порівняння імпедансних та квазі-імпедансних ланок показано в багатьох статтях [20–23].

Крім того, згідно з [23], конденсатори та напівпровідникові прилади мають більші показники відмов та старіння (відповідно 30 та 21 %) серед усіх компонентів в електронній системі. Традиційний підвищуючий перетворювач має два напівпровідникові пристрої та конденсатор, у той час як перетворювач на основі імпедансної ланки не має додаткових напівпровідникових приладів. Нарешті, додавання імпедансної ланки підвищує надійність системи, оскільки в такій схемі відсутні заборонені стани комутації транзисторів.

При використанні перетворювача з імпедансною ланкою додається одна додаткова контрольна змінна, яка визначає тривалість режиму повної провідності, коли відкриті всі транзистори та використовується для керування вихідної напруги. У порівнянні зі звичайним перетворювачем таке рішення має кращу ефективність для коефіцієнтів підсилення від 1 до 1,34, не вимагає додаткових напівпровідникових пристроїв. Запропонована однорівнева система перетворювача досягла коефіцієнта потужності 0,987 при повному завантаженні та регулюванні вихідної напруги системи до 200 В. Результати експериментів базувалися на прототипі потужністю 1 кВт з 20-сантиметровим повітряним зазором між перетворювачем первинної та вторинної частини.

У розробленій авторами [24] системі представлено економічно ефективна конструкція антен для передачі бездротової енергії в електричних скутерах. Запропоноване рішення може бути застосоване до будь-якого комерційного електричного скутера, самоката, іншого дво- та трьохколісного електротранспорту із живленням 48 В/20 Аг. Використання антени направленої форми дозволило підвищити ефективність передачі енергії. Передаючі котушки встановлюються під шасі скутера. Приймаюча котушка вкладається в нижній шар шасі, де знаходиться повітряний зазор між цими двома котушками – близько 10 см. З метою уніфікації та стандартизації робоча частота становить 85 кГц. Із відповідним джерелом живлення акумулятор можна швидко та зручно заряджати бездротовим способом. Експериментальні результати підтверджують бажану продуктивність та доцільність.

Прототип системи має такі параметри: потужність: 0,8 кВт, ємність батареї 1кВт/год, середня швидкість 40 км/год, напруга 40В, максимальне навантаження 100 кг.

На рис. 8 показана спрощена схема WPT на електричних транспортних засобах (скутерах).

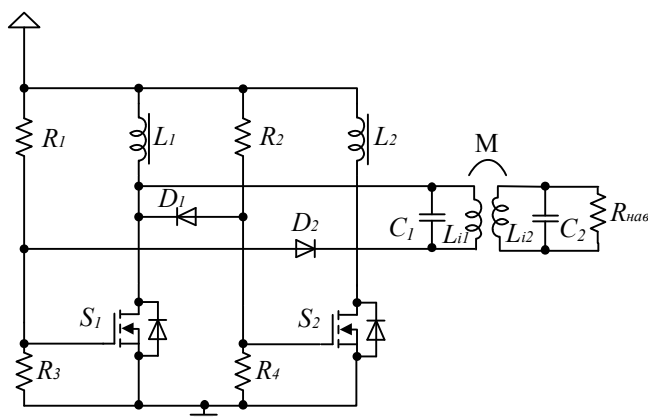


Рис. 8. Спрощена схема системи БПЕ на скутері

Як уже було згадано раніше під час аналізу базових топологій, паралельно-паралельна топологія має дещо більші переваги при значному навантаженні, тому в електроскутері застосовується саме така система бездротової передачі енергії.

Крім суто схемотехнічних рішень, є й інші у сфері силової електроніки, які покращують ефективність бездротової передачі електроенергії. У статті [25] представлено новий високоефективний планарний підхід до об'єднання всіх магнітних компонентів первин-

но-паралельного ізольованого підсилюючого перетворювача в структуру форми E-I-E-core (планарний інтегрований магнетик -planar integrated magnetic - PIM). Оскільки така структура дозволяє трансформаторам і індуктивностям бути електромагнітно розв'язаними, то цей спосіб може бути використаний у багатьох інших ізольованих dc-dc топологіях, де декілька трансформаторів та індуктивностей з'єднуються провідниками.

Всі магнітні компоненти в перетворювачі, в тому числі дві вхідні індуктивності та два трансформатори з первинною паралельною і вторинною послідовною обмоткою, інтегровані в E-I-E-core геометрію, зменшуючи загальний об'єм фериту та втрату в осерді. Перевірка роботи експериментального прототипу 2 кВт підтверджує високу ефективність 95,9 %, яка може бути досягнута при номінальних робочих умовах 1,5 кВт.

Висновки і пропозиції. У цій роботі виконаний огляд основних технологій бездротової зарядки накопичувачів енергії для малопотужних систем. Було виявлено, що індуктивний спосіб передачі енергії є найбільш ефективним на цей момент. Водночас слід відзначити, що при збільшенні відстані передачі ефективність значно падає. Покращення геометрії магнітних компонентів є основним напрямком дослідження в цьому напрямку. Основні топологічні рішення схем силової електроніки зводяться до реалізації чотирьох основних способів компенсації для отримання синусоїдальної напруги. Подальші дослідження можуть бути направлені на зменшення кількості напівпровідників та альтернативним способом реалізації компенсації.

Список використаних джерел

1. R. Bosshard, J.W. Kolar, "Inductive power transfer for electric vehicle charging: Technical challenges and tradeoffs," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 22-30, Nov. 2016.
2. J.-Y. Lee and B.-M. Han, "A Bidirectional Wireless Power Transfer EV Charger Using Self-Resonant PWM", *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, VOL. 30, NO. 4, APRIL 2015.
3. Chan T. Rim. Practical Design of Wireless Electric Vehicles: Dynamic & Stationary Charging Technologies. March 2017 .
4. H. Zeng, S. Yang, F. Z. Peng, "Design Consideration and Comparison of Wireless Power Transfer via Harmonic Current for PHEV and EV Wireless Charging", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Year: 2017, Volume: 32, Issue: 8.
5. A. J. Moradewicz, Marian Kazmierkowski "Contactless Energy Transfer System With FPGA-Controlled Resonant Converter" *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol 57, no 9, pp. 3181-3190, 2010.
6. Chenyang Xia, Yuejin Zhou, Juan Zhang and Chaowei Li "Comparison of Power Transfer Characteristics between CPT and IPT System and Mutual Inductance Optimization for IPT System". *Journal Of ComputerS*, Vol. 7, No. 11, November 2012, pp.2734-2741.
7. Приступа А. Л. Експериментальна установка для дослідження теслівських процесів при безконтактній зарядці акумуляторів / А. Л. Приступа, І. В. Пентегов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Серія «Технічні науки». – 2012. – № 1 (55). – С. 233–239.
8. Волков И. В. Тесловские процессы в высоковольтных высокочастотных электрических цепях / И. В. Волков, И. В. Пентегов // Технічна електродинаміка: Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – К. : ІЕД НАНУ, 2000. – Ч. 1. – С. 7–11.
9. Пентегов И. В. О возможности осуществления бесконтактной подзарядки аккумуляторов имплантированных электростимуляторов / И. В. Пентегов, И. В. Волков, А. Л. Приступа // Технічна електродинаміка: Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – К. : ІЕД НАНУ, 2008. – Ч. 5. – С. 109–113.
10. Mohammad Hassan Ameri, Ali Yazdian Varjani, and Mustafa Mohamadian "A New Maximum Inductive Power Transmission Capacity Tracking Method" *Journal of Power Electronics*, November 2016, Volume 16 Number 6. pp.2202-2211.
11. Как устроена и работает беспроводная зарядка для телефона [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://elektrik.info/device/1196-kak-ustroena-i-rabotaet-besprovodnaya-zaryadka-dlya-telefona.html>.
12. Технология беспроводной зарядки: принцип действия, стандарты, производители. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/doc/70732>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

13. Benjamin L. Cannon, James F. Hoburg, Daniel D. Stancil “Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers”. *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 24, Issue: 7, July 2009), pp. 1819–1825.
14. Qi.Wireless power consortium [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.wirelesspowerconsortium.com>.
15. Suvendu Samanta, Akshay Kumar Rathore ” Wireless power transfer technology using full-bridge current-fed topology for medium power applications”. *IET Power Electronics* (Volume: 9, Issue: 7, 27 2016), pp. 1903–1913 .
16. Ni B, Chung CY and Chan HL. “Design and comparison of parallel and series resonant topology in wireless power transfer”. In: Proceedings of 2013 IEEE 8th conference on industrial electronics and applications, Melbourne, VIC, Australia, 19–21 June 2013, pp.1832–1837.
17. Petersen, Marinus; Fuchs, Friedrich W., "Design of a Highly Efficient Inductive Power Transfer (IPT) System for Low Voltage Applications", PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of, 19-21 May 2015.
18. Petersen, Marinus; Fuchs, Friedrich W., "Investigation of Power Electronics Topologies for Inductive Power Transfer (IPT) Systems in High Power Low Voltage Applications". Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 2015 17th European Conference; Proceedings of, 8–10 Sept 2015.
19. Nomar S. González-Santini, Hulong Zeng, Yaodong Yu, Fang Zheng Peng "Z-Source Resonant Converter With Power Factor Correction for Wireless Power Transfer Applications". *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 31, Issue: 11, Nov. 2016), pp. 7691 – 7700.
20. Гусев О. О. Порівняння імпедансних ланок для перетворювачів з джерелом напруги / О. О. Гусев, А. І. Чуб, Д. В. Вінніков // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 3 – С. 25–32.
21. Husev, O., Blaabjerg, F., Clemente, C.R., Cadaval, E.R., Vinnikov, D., Siwakoti, Y., Strzelecki, R.: ‘Comparison of the Impedance-Source Networks for Two and Multilevel Buck-Boost Inverter Applications’, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016, 31 (11), pp. 7564–7579.
22. Dmitry Panfilov, Oleksandr Husev, Frede Blaabjerg, Janis Zakis, Kamal Khandakji, “Comparison of three-phase three-level voltage source inverter with intermediate dc–dc boost converter and quasi-Z-source inverter”, *IET Power Electronics*, 6, pp. 1238–1248, 2016.
23. S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, and P. Tavner, “Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752, Nov. 2010.
24. Jia-Shiun Tsai, Jia-Sheng Hu, Sin-Li Chen and Xiaoliang Huang. “Directional antenna design for wireless power transfer system in electric scooters”. *Advances in Mechanical Engineering* 2016, Vol. 8 (2), 1–13.
25. Ouyang Z., Sen G., Thomsen O., and Andersen M. “Analysis and Design of Fully Integrated Planar Magnetics for Primary-Parallel Isolated Boost Converter”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (Volume: 60, Issue: 2, Feb. 2013), pp. 494–508.

References

1. Bosshard, R., Kolar, J.W. (2016). Inductive power transfer for electric vehicle charging: Technical challenges and tradeoffs. *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 22–30, Nov. 2016.
2. Lee J.-Y. and Han B.-M. (2015). A Bidirectional Wireless Power Transfer EV Charger Using Self-Resonant PWM. *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, vol. 30, no. 4, APRIL 2015.
3. Chan T. Rim. *Practical Design of Wireless Electric Vehicles: Dynamic & Stationary Charging Technologies*. March 2017.
4. H. Zeng, S. Yang, F. Z. Peng (2017). Design Consideration and Comparison of Wireless Power Transfer via Harmonic Current for PHEV and EV Wireless Charging”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, volume: 32, Issue: 8.
5. Moradewicz, A.J., Marian Kazmierkowski (2010). Contactless Energy Transfer System With FPGA-Controlled Resonant Converter. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 9, pp. 3181–3190.
6. Chenyang Xia, Yuejin Zhou, Juan Zhang and Chaowei Li (2012). Comparison of Power Transfer Characteristics between CPT and IPT System and Mutual Inductance Optimization for IPT System. *Journal Of ComputerS*, vol. 7, no. 11, November 2012, pp. 2734–2741.

7. Prystupa, A. L., Pentehov, I. V. (2012). Eksperymentalna ustanovka dlia doslidzhennia teslivskykh protsesiv pry bezkontaktnii zariadtsi akumulatoriv [Experimental installation for studying the process of storks in contactless charging of accumulators]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*: Serii: Tekhnichni nauky – *Visnyk of Chernihiv State Technological University*, № 1 (55), pp. 233–239 (in Ukrainian).

8. Volkov, I. V., Pentegov, I. V. (2000). Teslovskie processy v vysokovolnykh vysokochastotnykh jelektricheskikh tsepakh [Teslov processes in high-voltage high-frequency electric circuits]. *Tekhnichna elektrodinamika: Tem. vypusk “Problemy suchasnoi elektrotehniki” – Technical electrodyamics. Special issue “The problem of modern electrotechnology”*. Part 1. Kyiv: IED NANU, pp. 7–11 (in Russian).

9. Pentegov, I.V., Volkov, I.V., Pristupa, A.L. (2008). O vozmozhnosti osushhestvleniia beskontaktnoi podzariadki akumulatorov implantirovannykh elektrostimulatorov [On the possibility of carrying out non-contact charging of batteries of implanted electrostimulators]. *Tekhnichna elektrodinamika: Tem. vypusk “Problemy suchasnoi elektrotehniki” – Technical electrodyamics. Special issue “The problem of modern electrotechnology”*. Part 5. Kyiv: IED NANU, pp. 109–113 (in Russian).

10. Mohammad Hassan Ameri, Ali Yazdian Varjani, and Mustafa Mohamadian “A New Maximum Inductive Power Transmission Capacity Tracking Method”. *Journal of Power Electronics*, November 2016, Volume 16, Number 6. pp. 2202–2211.

11. *Kak ustroena i rabotaet besprovodnaia zariadka dlia telefona [How the wireless charging for the phone works and works]*. Retrieved from <http://elektrik.info/device/1196-kak-ustroena-i-rabotaet-besprovodnaya-zaryadka-dlya-telefona.html>.

12. *Tehnologiya besprovodnoi zariadki: printsip deistviia, standarty, proizvoditeli [Wireless charging technology: the principle of operation, standards, manufacturers]*. Retrieved from <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/doc/70732>.

13. Benjamin L. Cannon, James F. Hoburg, Daniel D. Stancil “Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers”. *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 24, Issue: 7, July 2009), pp. 1819–1825.

14. *Qi. Wireless power consortium*. Retrieved from <https://www.wirelesspowerconsortium.com>.

15. Suvendu Samanta, Akshay Kumar Rathore “Wireless power transfer technology using full-bridge current-fed topology for medium power applications”. *IET Power Electronics* (Volume: 9, Issue: 7, 27 2016), pp. 1903–1913.

16. Ni B, Chung CY and Chan HL. “Design and comparison of parallel and series resonant topology in wireless power transfer”. In: *Proceedings of 2013 IEEE 8th conference on industrial electronics and applications*, Melbourne, VIC, Australia, 19–21 June 2013, pp. 1832–1837.

17. Petersen, Marinus; Fuchs, Friedrich W., “Design of a Highly Efficient Inductive Power Transfer (IPT) System for Low Voltage Applications”. *PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*; Proceedings of, 19–21 May 2015.

18. Petersen, Marinus; Fuchs, Friedrich W., “Investigation of Power Electronics Topologies for Inductive Power Transfer (IPT) Systems in High Power Low Voltage Applications”. *Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, 2015 17th European Conference; Proceedings of, 8–10 Sept 2015.

19. Nomar S. González-Santini, Hulong Zeng, Yaodong Yu, Fang Zheng Peng “Z-Source Resonant Converter With Power Factor Correction for Wireless Power Transfer Applications”. *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 31, Issue: 11, Nov. 2016), pp 7691–7700.

20. Husev, O. O., Chub, A. I., Vinnikov, D. V. (2015). Porivniannia impedansnykh lanok dlia peretvoriuvachiv z dzherelom napruhy [Comparison of Impedance Links for Voltage Converters]. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrodyamics*, № 3, pp. 25–32 (in Ukrainian).

21. Husev, O., Blaabjerg, F., Clemente, C.R., Cadaval, E.R., Vinnikov, D., Siwakoti, Y., Strzelecki, R. (2016). Comparison of the Impedance-Source Networks for Two and Multilevel Buck-Boost Inverter Applications, *IEEE Trans. Power Electron.*, 31 (11), pp. 7564–7579.

22. Dmitry Panfilov, Oleksandr Husev, Frede Blaabjerg, Janis Zakis, Kamal Khandakji (2016). Comparison of three-phase three-level voltage source inverter with intermediate dc–dc boost converter and quasi-Z-source inverter, *IET Power Electronics*, no. 6, pp. 1238–1248.

23. S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, and P. Tavner (2010). Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752, Nov. 2010.

24. Jia-Shiun Tsai, Jia-Sheng Hu, Sin-Li Chen and Xiaoliang Huang (2016). Directional antenna design for wireless power transfer system in electric scooters. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 8 (2), 1–13.

25. Ouyang Z., Sen G., Thomsen O., and Andersen M. (2013). Analysis and Design of Fully Integrated Planar Magnetics for Primary-Parallel Isolated Boost Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, issue: 2, Feb. 2013, pp. 494–508.

UDC 621.3.08

Viktor Shevchenko, Bohdan Pakhaliuk, Oleksandr Husev

REVIEW THE MAIN TECHNOLOGIES OF THE WIRELESS CHARGING OF ENERGY ACCUMULATORS FOR SMALL-PURCHASING SYSTEMS

Urgency of the research. The development of new topologies, methods for calculation and optimization of semiconductor transducers for WPT systems will allow to increase the electric energy transmitted wirelessly, extend the range of frequency regulation, which will reduce the time spent on recharge of electric vehicles and increase the convenience of using WPT systems by reducing the sensitivity to precise positioning of receiving and transmitting elements, which will become a prerequisite for more active introduction of electric vehicles and electric vehicles. In conditions of different ecological, demographic, economic situation in the world, the individual electric transport is becoming more and more popular.

Solving the set tasks will create preconditions for the implementation of WPT in many spheres of society, both in Ukraine and in the world as a whole (private transport, military equipment and equipment, household electronics, etc.).

Target setting. Now methods of wireless power transfer (WPT), based on the phenomena of electrostatic and electromagnetic induction, are widely used in various applications. WPT method is widely used today in low-power systems - wireless charging of mobile phones, razors, toothbrushes, low-power vehicles.

The main constraints of such systems are low efficiency at high transmission distances and relatively large mass-size parameters of the elements, which in turn leads to high cost of WPT system. Recently, there are more and more consumers who need to transmit contactless method of electric energy from units of kilowatts or higher.

Actual scientific researches and issues analysis. The analysis of the state of research shows that the subjects of research on the improvement of wireless charging systems are constantly expanding and are extremely relevant, in particular, abroad. Especially considering the development of electric vehicles, there is growing interest in wireless charging of vehicles. There is also a solution to the inductive power transmission system for low and high voltage power supplies.

Uninvestigated parts of general matters defining. If static and dynamic charging of electric cars is devoted to many articles and developments, then the individual means of travel are paid less attention, so the design of low-voltage wireless charging for electric bikes, electric scooters, and velomobiles is a promising area of research. Modern research is aimed at achieving lower cost and improving the efficiency of wireless charging systems for such vehicles.

The research objective. The main tasks are to review and compare existing topologies, calculation methods, and optimization of WPT systems.

The statement of basic materials. In the first part of the article general information about principles of operation and application of capacitive and inductive method of wireless transmission of energy are considered, advantages and disadvantages, efficiency are presented. The emphasis is on magnetic resonance communication, the main compensating topologies are considered. Graphs of the dependence of the transfer function of the WPT on the frequency for the serial-serial resonance scheme are constructed. The probable dependence of the distance between the transmitter and receiver is separately presented.

In the second part of the article an analysis of the existing power semiconductor topology WPT based on inductive coupling and various compensating topologies. Initially, inductive energy transmission systems for low voltage power supplies are analyzed. The topologies of primary and secondary dc-dc converters are selected and compared from the point of view of the required nominal power and efficiency. The WPT system based on the current inverter and the compensating resonance PS-topology for electric vehicles and devices for charging the battery are analyzed. An interesting article is considered, which analyzes and compares the proposed onboard electric vehicle charger based on an impedance link with a conventional OBC. The following is a variant of the topology and cost-effective design of antennas for the transmission of wireless energy in electric scooters. In addition to purely circuit design, other solutions in the field of power electronics are considered, which will improve the efficiency of wireless power transmission. A new high-performance planar approach is presented for the integration of all magnetic components of the primary-parallel isolated enhancer converter into the structure of the form E-I-E-core planar integrated magnetic (PIM).

Conclusions. The article gives an overview of the main technologies of wireless charging of energy storage devices for low-power systems. It has been found that the inductive mode of energy transmission is most effective now. At the same time, it should be noted that with increasing transmission distance, efficiency falls significantly. The improvement of the geometry of magnetic components is the main focus of research in this direction. The main topological solutions of power electronics circuits are reduced to the implementation of four main methods of compensation for obtaining sinusoidal voltage. That is, for different tasks, different topologies are selected with those or other modifications, depending, first of all, on the power that needs to be transmitted and the load. Further research may be aimed at reducing the number of semiconductors and alternative ways to realize compensation.

Key words: wireless transmission of energy; magnetic resonance bond; compensating topology; onboard charger; high frequency inverter.

Fig.: 8. Bibl.: 25.

УДК 621.3.08

Виктор Шевченко, Богдан Пахалюк, Александр Гусев

ОБЗОР ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МАЛОМОЩНЫХ СИСТЕМ

Беспроводная передача энергии является неотъемлемой частью современного мира. Статья посвящена обзору существующих современных решений беспроводных зарядных устройств для маломощных систем. В частности кратко рассмотрены основные виды беспроводной передачи энергии, преимущества и недостатки каждого из методов. Более подробно рассмотрено индуктивный способ передачи как одного из наиболее распространенного и перспективного. Проанализированы основные топологические решения схем силовой электроники. Обсуждены основные проблемы и дальнейшие направления исследований в этой сфере.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; магнитно-резонансная связь; высокочастотный инвертор.

Рис.: 8. Библ.: 25.

Шевченко Виктор Александрович – аспірант ЧНТУ, асистент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Шевченко Виктор Александрович – аспирант ЧНТУ, ассистент кафедры биомедицинских радиоэлектронных аппаратов и систем, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Shevchenko Viktor – Phd student, assistant of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: shevaip1990@gmail.com

Пахалюк Богдан Петрович – студент ЧНТУ, магістр кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Пахалюк Богдан Петрович – студент ЧНТУ, магистр кафедры промышленной электроники, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Pakhaliuk Bohdan – student, master of Industrial Electronics Department, Chernihiv national university of technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bohdan.pakhaliuk@gmail.com

Гусев Александр Александрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Гусев Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры биомедицинских радиоэлектронных аппаратов и систем, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Oleksandr Husev – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oleksandr.husev@gmail.com

ORCID: orcid.org/0000-0001-7810-457X

ResearcherID: F-5792-2014

Scopus Author ID: 45861130600