

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Пахалюка Богдана Петровича** на тему:

**«Напівпровідникові перетворювачі з покращеними масогабаритними параметрами для бездротової зарядки на основі імпедансної ланки в резонансному режимі»,**

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

### *Актуальність обраної теми дисертаційного дослідження*

Світові тенденції розвитку транспортних засобів мають чітку спрямованість на застосування електротранспорту, що використовує акумуляторні батареї як джерело живлення. Така тенденція обумовлена незаперечними перевагами по відношенню до традиційних транспортних засобів на вуглеводневих енергоносіях, а саме: екологічність, безшумність, простота і легкість управління, а також економічність під час експлуатації. На фоні зростання популярності електротранспортних засобів особливе значення набуває розробка бездротових зарядних пристроїв, серед яких найбільш привабливими вважаються системи з індукційним способом передачі енергії. В цьому напрямку пошук і дослідження рішень виконання зарядних станцій, на що спрямована дисертаційна робота Пахалюка Б. П., стає особливо актуальною задачею. Покращення експлуатаційних характеристик, підвищення ефективності роботи перетворювача та якості вихідної енергії з використанням нетрадиційних конфігурацій системи з додатковою імпедансною ланкою, що є метою дисертаційного дослідження, яке розглядається, може виявитися одним з перспективних напрямків розвитку бездротової передачі енергії.

### *Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами*

Дисертаційна робота виконана в Національному університеті «Чернігівська політехніка» за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки України «Енергетика та енергоефективність» в рамках науково дослідної теми «Високоєфективна система бездротової зарядки низьковольтних накопичувачів енергії легких електричних транспортних засобів» №0117U007260, «Високоєфективні системи бездротової передачі електричної енергії на основі нових топологій напівпровідникових перетворювачів» №0118U003865, «Забезпечення максимальної ефективності автономних електроенергетичних систем на основі фотоелектричних перетворювачів для спеціальних застосувань» №0123U100975.

### *Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій*

Загальною особливістю дисертаційної роботи є її практична спрямованість, тому дослідження крім ґрунтового теоретичного аналізу

містить необхідне наповнення розрахунковими і експериментальними результатами. Структура дисертаційної роботи є логічною, вибір і застосування методів дослідження є обґрунтованим і свідчить про системний підхід до аналізу основної проблематики дослідження. Достовірність отриманих результатів дослідження підтверджується кваліфікованим застосуванням необхідних методів: теорії електричних кіл, включаючи положення теорії резонансних систем, перетворення Лапласа, математичне моделювання, методи оптимізації нелінійних систем, фізичний експеримент.

Доцільність застосованих методів, обґрунтованість і достовірність отриманих результатів, зроблених висновків і рекомендацій підтверджуються апробацією на достатній кількості міжнародних і вітчизняних наукових конференцій.

### ***Структура і зміст дисертаційної роботи.***

Дисертаційна робота носить комплексний характер і включає практично весь комплекс проблем, пов'язаних з аналізом робочих режимів і розробкою системи бездротового живлення, заснованого на використанні явища електромагнітної індукції, яке містить новий структурний елемент – імпедансну ланку. Все це обумовило структуру дисертаційного дослідження.

Перший розділ присвячений огляду сучасного стану технології бездротової передачі енергії. Наведені основні методи передачі електричної енергії з приведенням їх переваг і недоліків. Порівняльна характеристика сучасного стану ринку малопотужних транспортних засобів дозволила визначені основні робочі параметри, які потрібні для системи бездротової передачі енергії.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу підходів до реалізації системи бездротової передачі енергії з використанням індуктивного способу передачі енергії та аналізу обмежень цієї технології. Основна увага приділена аналізу і порівнянню різних рішень інверторів з одною і двома передавальними котушками, а також рішення з використанням додаткової імпедансної ланки. Розглянуто різноманітні системи компенсації реактивної потужності. Також проведений аналіз обмежень, пов'язаних з масогабаритними показниками передавальної і приймальної котушок.

Третій розділ присвячений аналізу бездротового способу передачі енергії із застосуванням імпедансної ланки. На основі аналізу основних станів роботи схеми розроблена математична модель, в якій використано метод припасування для окремих етапів роботи системи. Дослідження роботи передавальних і приймальних котушок, впливу геометричних факторів проведено на основі моделювання методом скінченних елементів з використанням сучасного програмного пакету ANSYS Maxwell.

Четвертий розділ присвячений багатопараметричній оптимізації системи бездротової передачі енергії з використанням генетичного алгоритму. Були визначені обмеження основних і побічних параметрів оптимізації для отримання системи передачі енергії з покращеними масогабаритними показниками.

В п'ятому розділі досліджено запропоновану багатоконтурну систему керування, яка включала в себе можливість компенсації комунікаційної затримки, що значно покращувало стабільність роботи регулятора при значних коливаннях параметрів моделі і комунікаційної затримки.

Шостий розділ призначений експериментальній верифікації запропонованого рішення з використанням імпедансної ланки при невеликих значеннях потужності. Використання імпедансної ланки разом із застосуванням меншої кількості реактивних компонентів дозволило збільшити значення ефективності на 32 проценти у порівнянні з традиційним рішенням, а також покращити масогабаритні показники.

#### ***Відповідність дисертаційної роботи встановленим вимогам***

Дисертаційна робота є добре структурованою, послідовною та завершеною працею, що виконана автором самостійно. Результати дослідження оформлені у відповідності до встановлених вимог.

Структура дисертаційної роботи складається з таких частин: вступу, шести розділів, та висновків. Основний текст роботи налічує 154 сторінки, а загальний обсяг роботи складає 233 сторінки.

#### ***Наукова новизна одержаних результатів***

Серед комплексу проведених досліджень наукову новизну складають наступні одержані результати.

1. Вперше запропоновано використання імпедансної ланки як одночасного інвертора і передавача для систем бездротової передачі енергії в резонансному режимі, що дозволяє зменшити кількість напівпровідникових і реактивних елементів, а також спростити систему керування.

2. Науково обґрунтовано доцільність застосування запропонованого способу керування системою бездротової передачі енергії з використанням імпедансної ланки в резонансному режимі з врахуванням суттєвої затримки передачі даних між приймальною та передавальною частинами, що значно покращує функціональність та надійність пристрою.

3. На відміну від звичайно використовуваних математичних моделей високого порядку, де враховуються параметри більшості елементів системи бездротової передачі енергії, для робочого стану в режимі резонансу розроблена спрощена математична модель, коли приймач можна представити у вигляді еквівалентного резистора, що дозволило значно зменшити порядок диференціальних рівнянь і дало можливість отримати її характеристики в усталеному режимі на основі аналітично опису роботи схеми.

#### ***Практичне значення результатів дослідження***

- До практично значимих результатів слід віднести отримані результати багатопараметричної оптимізації системи бездротової передачі енергії з використанням імпедансної ланки, а також підхід, застосований для системи, що розглядається, на основі використання генетичного алгоритму.

- Практичне значення мають також розроблені малопотужні прототипи, які дозволяють порівняти запропоновані рішення на основі імпедансної ланки в резонансному режимі, а також довести, що рішення з імпедансною ланкою має

значно вищі показники ефективності та розмірів реактивних компонентів у порівнянні з класичним рішенням.

- Результати досліджень, які отримані в дисертаційному дослідженні, можуть бути також використані в навчальному процесі для вдосконалення лекційних курсів та оновлення циклів лабораторних робіт з дисциплін «Технології бездротової передачі енергії» (спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

### ***Повнота викладення наукових результатів дисертації в опублікованих працях***

За результатами дослідження опубліковано 14 наукових праць і отримано два патенти України на винахід. З них: чотири статті у виданнях, індексованих у міжнародній наукометричній базі даних Web of Science, дві статті у наукових фахових виданнях, вісім робіт, що представлені на наукових конференціях, частина з яких також опубліковано у виданнях, що індексуються у Scopus та Web of Science.

Наукові публікації відповідають вимогам п. 8, 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р., № 44.

### ***Дотримання норм академічної доброчесності***

За результатами аналізу представлених матеріалів не встановлено фактів порушення академічної доброчесності.

Дисертант дотримувався норм та принципів академічної доброчесності, норм законодавства про авторське право, порушень яких, як і академічного плагіату, не виявлено. У дисертації наявні посилання на відповідні джерела, зазначені у списку використаних джерел, визначено особистий внесок автора в опублікованих у співавторстві працях.

### ***Зауваження.***

Визначаючи високий рівень дисертаційного дослідження, слід зазначити наступні зауваження та дискусійні положення.

1. В системах бездротової передачі енергії індукційним способом, де застосовуються контури в режимі резонансу, суттєве значення має добротність  $Q$  контурів – параметр, якому, на відміну від інших, в дисертаційній роботі приділена значно менша увага. Разом з тим, раніше іншими авторами було показано, що ефективність визначається добутком коефіцієнту магнітного зв'язку  $k$  та добротності котушок, існує оптимальна величина цього співвідношення, причому, для досягнення ККД більше 80%, необхідно мати значення  $Qk > 10$ . (Наприклад, <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.011>).

2. В роботі відмічається, що рішення з використанням двох передавальних котушок, що мають 50% перекриття, показало кращі результати відносно зміщення приймальної котушки. Однак оскільки поза зоною перекриття котушок індукція магнітного поля зменшується і відповідно зменшується потік магнітного поля через приймальну котушку в цьому

положенні, то залишається незрозумілим чи є загальний позитивний ефект такого рішення.

3. В режимі резонансу величини напруг і струмів на окремих елементах системи можуть значно перевищувати їх величини на вході і виході системи, що суттєво впливає на масогабаритні параметри. Однак результати дослідження в цьому напрямі з'являються тільки для конкретних схем в розділі про оптимізацію параметрів і відсутні у розділах, де аналізується загальні питання системи передачі енергії.

4. Ряд недоліків стосуються рисунків і визначення величин, що використовуються. Так, на рис. 2.10б показана розрахована залежність власної індуктивності котушки від коефіцієнту зв'язку. Здається це не пов'язані один з одним параметри і тому цей рисунок у представленому вигляді є помилковим. Далі, на рис.2.4 і 2.5 наведена ефективність  $\mu$  в залежності від взаємної індуктивності і зміщення котушок. Але визначення ефективності  $\mu$  не надано і розгляд її ідентичною з іншим позначенням ефективності  $\eta$  як ККД навряд можливо із-за того, що  $\mu$  має значення дуже близьке до 100%.

5. У тексті існує ряд незрозумілих виразів і пунктуаційних помилок. На стор. 80 використовується незрозумілий вираз «перпендикулярно включені» котушки. На стор. 77 використано невдалий термін «дизайн котушок», якій має зміст конфігурації чи геометрії котушок. Сторінка 84 містить вираз незрозумілого змісту: «Площа розраховувалася як відношення ширини котушки до її довжини». У багатьох сторінках тексту відсутні коми. Наприклад, вони відсутні: на стор. 114 - 4 коми, на стор. 115 – 2 коми, на стор, 117 – 6 ком.

6. Висновки по результатам дослідження у розділах і загальні висновки у більшості сформульовано як перелік виконаних досліджень, замість тих наслідків, які можна зробити на основі проведеної роботи.

Наведені зауваження не впливають на загальний позитивний висновок відносно виконаної дисертаційної роботи.

### ***Загальні висновки та оцінка дисертації***

Дисертаційна робота на тему «Напівпровідникові перетворювачі з покращеними масогабаритними параметрами для бездротової зарядки на основі імпедансної ланки в резонансному режимі» є самостійною та завершеною працею, в області дослідження і розробки систем бездротової передачі енергії за допомогою пристроїв індукційного типу, має наукову новизну та практичне значення.

Дисертаційне дослідження відповідає спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

За змістом, структурою, обсягом та оформленням дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (зі змінами) та «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової

установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022.

Зазначене дозволяє зробити висновок що Пахалюк Богдан Петрович, автор дисертації на тему «Напівпровідникові перетворювачі з покращеними масогабаритними параметрами для бездротової зарядки на основі імпедансної ланки в резонансному режимі» заслуговує на присудження ступеня доктор філософії за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

**Офіційний опонент:**

доктор технічних наук, професор,  
головний науковий співробітник  
відділу електромагнітних систем № 7  
Інституту електродинаміки НАН України

Ю.М. Васецький