

## АНОТАЦІЯ

*Шевченко В.О.* Система безпроводної передачі енергії на основі багаторівневих перетворювачів з покращеними масогабаритними параметрами – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Національний університет «Чернігівська політехніка», МОН України; Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ, -2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого наукового завдання – покращення масогабаритних параметрів системи безпроводної передачі енергії (БПЕ), а саме безпроводного зарядного пристрою (БЗП) для низьковольтних акумуляторних батарей індивідуальних електричних транспортних засобів шляхом огляду, аналізу, порівняння, розрахунків, обґрунтування вибору та впровадження комплексу науково-практичних технічних і програмних методів та засобів.

Відомо, що у розвинених країнах світу прийнята та активно підтримується довготривала стратегія, спрямована на зменшення викидів вуглекислого газу. Відповідно останнім часом у світі з'являється все більше споживачів, які потребують передачі електричної енергії безконтактним способом через котушки індуктивності, зокрема для підзарядки акумуляторів електромобілів, одночасної підзарядки акумуляторів портативних пристроїв військового застосування (дрони, радіостанції, тощо), живлення елементів промислових систем автоматизації та робототехніки. Також кількість електротранспорту різної потужності активно збільшується щороку. Зокрема розвивається малопотужний індивідуальний електротранспорт, як-от електровелосипеди, електросамокати, гіроборди тощо, через доступність та зручність користування. Ось чому актуалізується розроблення зарядних пристроїв для низьковольтних накопичувачів енергії в цих транспортних засобах.

Основними перевагами БПЕ над дрововими зарядними пристроями є, власне, відсутність контактного з'єднання, що означає збільшену механічну міцність,

відсутність іскріння, підвищену електробезпеку, система менше піддається впливу пилу і вологи, внаслідок чого покращується зручність користування.

За результатами огляду встановлено, що основними проблемами та перешкодами в поширенні пристроїв БПЕ серед приватних користувачів є вартість та розміри БЗП, які більші в 2-3 рази порівняно із дротовими аналогами.

Значна частина масогабаритних параметрів системи БПЕ припадає саме на магнітну складову – приймальну та передавальну котушки індуктивності. Отже способи їх мінімізації при збереженні прийнятної ефективності є дуже важливими та актуальними. Дослідники досі шукають оптимальні конфігурації системи та топології перетворювачів потужності, які як найкраще відповідатимуть вищезазначеним вимогам, хоча цим питанням приділяється замало уваги, порівняно з питанням підвищення ефективності систем БПЕ/БЗП. Проведено аналіз сучасних напівпровідникових рішень щодо реалізації малопотужних БЗП для електротранспорту, завдяки чому встановлено, що в переважній більшості систем в якості перетворювача енергії використовується класичний повномостовий інвертор та по одній передавальній та приймальній котушці індуктивності. Відповідно транзистори та передавальна котушка працюють із повною напругою, яка є на вході інвертора. Були розглянуті декілька відомих топологій, зокрема з одним транзистором, котрі можуть зменшити розміри та кількість компонентів лише в інверторі, проте вони жодним чином не можуть зменшити габаритні розміри котушок індуктивності.

При збільшенні рівнів вхідної напруги, загальний рівень напруги на елементах схеми інвертора зменшується, що призводить до збільшення довговічності та надійності елементів, напруга та форма струму на виході інвертора покращуються. Тому вперше запропоновано підхід до вирішення проблеми збільшених масогабаритних параметрів шляхом зменшення напруги на транзисторах інвертора та котушках індуктивності.

Багаторівневий інвертор Т-типу з підключенням в середній точці вперше запропонований для використання в БЗП для низьковольтних накопичувачів енергії разом з двома розділеними передавальними котушками індуктивності з

середньою точкою та послідовно-паралельною компенсацією. Це дозволяє зменшити масогабаритні показники передавальної частини системи безпровідної зарядки через зменшення в 2 рази напруги на транзисторах інвертора та передавальних котушках індуктивності порівняно з класичним рішенням на базі повномостового інвертора.

Використання двох розділених передавальних котушок індуктивності зменшить струм через напівпровідники та кожен з котушок порівняно з однією, а отже і зменшить втрати потужності. Використання такого рішення на одній спільній феритовій пластині покращить масогабаритні параметри, зменшить в 2 рази кількість фериту та зовнішній діаметр магнітної частини передавача на відміну від рішення із двома звичайними передавальними котушками індуктивності.

Після проведеного детального огляду, аналізу та порівняння компенсаційних ланок визначено, що системи з послідовно-паралельною компенсацією дозволяють зменшити значення самоіндуктивності та розміри передавальної та приймальної котушок індуктивності й ефективно працюють із більш широким діапазоном навантажень, ніж інші розглянуті компенсаційні ланки. Зовнішній діаметр передавальних котушок та вага літцендрату порівняно із котушкою для класичного рішення для послідовно-паралельної компенсації зменшується в 2 рази, маса фериту зменшується в 3,5 раз. Водночас значення первинної самоіндуктивності буде меншим від 8 до 15 разів порівняно із класичним інвертором з однією передавальною котушкою, а значення вторинної самоіндуктивності при послідовно-паралельній компенсації буде меншим в 2,5 раз.

Вперше розроблено математичну модель пристрою безпровідної зарядки на основі інвертора Т-типу з розділеними котушками індуктивності, що дозволяє оцінювати втрати та розміри магнітних компонентів в залежності від номінальних параметрів компонентів. До того ж, проведено розрахунок та моделювання параметрів магнітних компонентів та компенсаційних ланок. За результатами аналізу втрат потужності, моделювання та порівняння систем БПЕ на базі звичайного та подвійного інвертора Т-типу із класичним повномостовим інвертором при двох різних рівнях потужності передачі енергії було доведено, що

замкнута система БПЕ на базі GaN транзисторів має найнижчі загальні втрати потужності з усіх розглянутих варіантів до 1,7 разів, і до 1,4 разів меншими за втрати в класичному інверторі.

Вперше проведено порівняльний аналіз використаних сучасних напівпровідників у запропонованому рішенні на основі інвертора T-типу, що показує переваги та недоліки їх практичного застосування та дозволяє обрати краще рішення. Встановлено, що розроблена система БПЕ на базі GaN транзисторів має компактні габаритні розміри через менший розмір самих транзисторів та відсутність радіаторів у комплексі із розділеними передавальними котушками індуктивності з послідовно-паралельною компенсацією і також має ефективність 90 % при максимальній дослідженій потужності 360 Вт, що відповідає рівню промислових зразків. Водночас для фінального впровадження прийнято рішення використовувати більш надійні SiC транзистори із більшим запасом по основних параметрах, перш за все по напрузі стоку-витоку (до 900 В) та потужності.

На основі досліджень в статтях автора розроблено та перевірено замкнуту систему керування покращеним безпровідним зарядним пристроєм на базі каскадного пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора з алгоритмом виявлення вторинної котушки індуктивності та функцією автоматичної зупинки процесу зарядки і захистом від надмірного перевищення струму та напруги зарядки, що покращує безпеку та зручність користування БЗП і практично не збільшує масогабаритні параметри. Вперше запропоновано налаштування системи керування безпровідної зарядки, яка враховує суттєву затримку передачі даних між приймальною та передавальною частинами, що покращує функціональність та надійність пристрою. Встановлено, що система залишається стабільною при затримці, що в 10 разів перевищує комунікаційну затримку безпровідної передачі даних, що свідчить про високу стійкість розробленої системи керування.

Розроблено та експериментально перевірено безпровідний зарядний пристрій для низьковольтних накопичувачів електричної енергії номінальною потужністю 110 Вт та номінальною напругою батареї 48 В на базі інвертора T-типу та розділеними передавальними котушками індуктивності із покращеними

масогабаритними показниками. Максимальна ефективність в режимі постійного струму була досягнута на рівні 90,5 %, в режимі постійної напруги – 88 %. Водночас коливання напруги зарядки в режимі постійної напруги становило менше 1 %, що свідчить про відмінні характеристики регулятора, а експериментально виміряна затримка безпроводної комунікації становила 1 мс, що в кілька разів нижче дослідженої межі нестабільності.

Розроблений фінальний варіант БЗП можна співставити за об'ємом та вагою із певними дротовими аналогами, якщо брати для порівняння потужність до 1 кВт. За результатами огляду існуючих аналогів встановлено, що безпроводні аналоги БЗП такого рівня потужності (100 Вт-1 кВт) в Україні та за кордоном практично відсутні. Тому результати досліджень відкривають шлях до комерціалізації покращеного перспективного БЗП з незначною адаптацією лабораторного зразка до практичного застосування.

*Ключові слова:* безпроводний зарядний пристрій, розділені котушки індуктивності, інвертор Т-типу, алгоритм детектування приймальної котушки індуктивності, масогабаритні параметри.

#### *Список публікацій здобувача*

1. В. Шевченко, Б. Пахалюк, О. Гусев. Огляд основних технологій бездротової зарядки накопичувачів енергії для малопотужних систем. *Технічні науки та технології*. 2017. № 4 (10). С. 133-146. (Особистий внесок – проведено огляд основних способів безпроводної передачі енергії та існуючих сучасних рішень реалізації пристроїв безпроводної передачі енергії на основі індуктивного зв'язку).

2. В. О. Шевченко, Б. О. Трейко, О. О. Гусев, Б. П. Пахалюк, О. Б. Хоменко. Огляд і порівняння базових топологій компенсації для бездротової передачі енергії. *Технічні науки та технології*. 2018. № 3 (13). С. 209–218. (Особистий внесок – проведено огляд та порівняння чотирьох базових класичних компенсаційних ланок для індуктивної передачі енергії).

3. Shevchenko,V., Khomenko,M., Kondratenko,I., Husev,O., Pakhaliuk,B. Experimental Comparison of Designed Inductance Coils for Wireless Power Transfer.

*Electrical, Control and Communication Engineering*. 2021. №16 (2). pp. 102-109. (Особистий внесок – особисто проведено експериментальне порівняння розроблених котушок індуктивності різних типів для безпроводної передачі енергії за допомогою використання класичної схеми БПЕ на основі повномостового інвертора).

4. V. Shevchenko, O. Husev, R. Strzelecki, B. Pakhaliuk, N. Poliakov and N. Strzelecka. Compensation Topologies in IPT Systems: Standards, Requirements, Classification, Analysis, Comparison and Application. *IEEE Access*, 2019. vol. 7, pp. 120559-120580. (Особистий внесок – Запропоновано нову класифікацію існуючих компенсаційних ланок, проведено повний огляд, комплексний аналіз та порівняння всіх відомих компенсаційних ланок для індуктивної передачі енергії; також узагальнено необхідні стандарти, вимоги до компенсаційних ланок та надано рекомендації щодо їхнього застосування в пристроях БПЕ).

5. Шевченко В., Кондратенко І., Гусев О., Хоменко О., Тительмаєр К. Оцінка точності моделі двошарової котушки індуктивності для бездротової передачі енергії за допомогою методу скінчених елементів. *Технічні науки та технології*. 2019. No 3 (17). С. 188–196. (Особистий внесок – запропоновано та розроблено спрощену модель індуктивності для оцінки точності моделі двошарової котушки індуктивності за допомогою методу скінчених елементів; зібрано та узагальнено і проведено порівняння інформації про різні структури, будову і складові котушок індуктивності для безпроводної передачі енергії).

6. Shevchenko, V.; Pakhaliuk, B.; Husev, O.; Veligorskyi, O.; Stepins, D.; Strzelecki, R. Feasibility Study GaN Transistors Application in the Novel Split-Coils Inductive Power Transfer System with T-Type Inverter. *Energies*. 2020. 13, 4535. (Особистий внесок – запропоновано і розроблено систему БПЕ із багаторівневим інвертором Т-типу на базі GaN транзисторів та розділеними передавальними котушками індуктивності; розроблено математичну модель втрат потужності основних компонентів даної системи: напівпровідників та магнітних елементів; брав участь у плануванні та проведенні експерименту).

7. Shevchenko, V.; Pakhaliuk, B.; Zakis, J.; Veligorskyi, O.; Luszcz, J.; Husev, O.; Lytvyn, O.; Matiushkin, O. Closed-Loop Control System Design for Wireless Charging of Low-Voltage EV Batteries with Time-Delay Constraints. *Energies* 2021, 14, 3934. (Особистий внесок – проведено аналіз та обрано доцільну структуру замкнутої системи в результаті огляду існуючих рішень для замкнутої системи БПЕ із багаторівневим інвертором Т-типу на базі SiC транзисторів та розділеними передавальними котушками індуктивності для безпроводної зарядки низьковольтних акумуляторних батарей; розроблено модифіковану систему керування БЗП на базі ПІ регуляторів, зокрема запропоновано алгоритм виявлення вторинної котушки індуктивності і дослідження стабільності замкненої системи керування із врахуванням затримки комунікації; особисто проводив експериментальні дослідження).

8. V. Shevchenko, O. Husev, B. Pakhaliuk and I. Kondratenko. Design and Simulation Verification of Low Power Wireless Charging Battery System for Electric Bicycle. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 22-27.

9. V. Shevchenko, O. Husev, B. Pakhaliuk, O. Karlov and I. Kondratenko. Coil Design for Wireless Power Transfer with Series-Parallel Compensation. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 401-407.

10. V. Shevchenko, O. Husev, O. Veligorskyi, B. Pakhaliuk and R. Strzelecki. Losses Model of the WPT System with Single-Phase T-Type Inverter. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 2020, pp. 107-112.