

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2\(44\)-444-458](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-444-458)

УДК 621.3.032

Денис Валерійович Смоляр¹, Анатолій Леонідович Приступа²¹аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)E-mail: smoliardenis@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7207-669X>²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)Email: anatoliy.prystupa@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>ResearcherID: [F-5507-2014](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698). SCOPUS Author ID: [57190807222](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698)

АНАЛІЗ МЕТОДІВ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

Актуальність дослідження зумовлено потребою підвищення ефективності та стабільності систем бездротової передачі енергії в умовах розвитку електротранспорту й автономних пристроїв. Мета статті – технічний аналіз індуктивного та ємнісного методів із кількісною оцінкою їх енергетичних характеристик. Досліджено вплив геометричного зазору на передану потужність і ККД, встановлено різну чутливість методів до зміни відстані, виявлено роль паразитних параметрів і режиму узгодження. Доведено, що індуктивні системи забезпечують вищу стабільність потужності, тоді як ємнісні ефективні лише при малих зазорах. Окреслено напрями подальших досліджень.

Ключові слова: індуктивний зв'язок; ємнісний зв'язок; резонансний режим; електромагнітне поле; коефіцієнт корисної дії; паразитні параметри; електромагнітна сумісність (ЕМС); силова електроніка; реактивний опір, безконтактне живлення.

Рис.: 4. Табл.: 4. Бібл.: 26.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена зростанням потреби у надійних та ефективних способах передачі електричної енергії без використання контактних з'єднань. Особливого значення це набуває в умовах розвитку електротранспорту, автономних пристроїв, сенсорних мереж та інтелектуальних енергетичних систем. Традиційні кабельні рішення обмежують мобільність обладнання, ускладнюють експлуатацію та знижують довговічність систем, що посилює інтерес до бездротових технологій як альтернативного підходу. Водночас існують технічні обмеження, пов'язані з енергоефективністю, електромагнітною сумісністю та безпекою, які потребують системного аналізу та узагальнення. У зв'язку з цим дослідження методів бездротової передачі енергії (БПЕ) є необхідним для обґрунтування напрямів їх удосконалення та практичного впровадження в сучасні енергетичні та технічні системи.

Постановка проблеми. Проблема БПЕ полягає у забезпеченні стабільної, енергоефективної та безпечної передачі електричної потужності без фізичних контактів за умов зростання вимог до мобільності, автономності та інтегрованості технічних систем. Попри активний розвиток індуктивних, резонансних і мікрохвильових технологій бездротової передачі енергії, залишаються невирішеними питання підвищення коефіцієнта корисної дії бездротових систем. Особливо актуальними є проблеми мінімізації втрат, забезпечення електромагнітної сумісності та відповідності нормативним вимогам.

Зазначена проблематика пов'язана з важливими науковими завданнями електротехніки, електромагнітних процесів і силової електроніки. Водночас вона має прикладне значення для модернізації енергетичної інфраструктури, розвитку електромобільності та створення автономних інтелектуальних пристроїв. Розв'язання окресленої проблеми сприятиме підвищенню надійності енергопостачання, зниженню експлуатаційних витрат і формуванню технологічних передумов для інтеграції бездротових рішень у сучасні інженерні системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасних досліджень у сфері БПЕ свідчить про поетапне формування цілісної наукової концепції цієї технології - від узагальнення фізичних принципів до розроблення спеціалізованих прикладних систем. У базових оглядових працях М. Б. Сідіку (М. В. Sidiku) та співавторів БПЕ розглядається як сукупність індуктивних, ємнісних та радіочастотних механізмів передачі потужності

без фізичного контакту між джерелом і приймачем, із визначенням їхніх технічних переваг і обмежень [1]. Комплексну систематизацію методів, сфер застосування та технологічних викликів подано М. М. Рахманом (M. M. Rahman) та співавторами, які акцентують увагу на проблемах масштабування, електромагнітної сумісності та втрат енергії [2]. Порівняльну оцінку ефективності різних архітектур здійснюють К. Детка (K. Detka) та К. Гурецькі (K. Górecki), пропонуючи критерії техніко-економічного аналізу БПЕ-систем [3]. О. Окойейґбо (O. Okoyeigbo) та співавтори розглядають БПЕ у контексті формування сталих енергетичних систем майбутнього, підкреслюючи необхідність підвищення коефіцієнта корисної дії та зниження втрат [4].

Поглиблення інженерного виміру досліджень пов'язане з розвитком індуктивної передачі енергії та магнітно-резонансних систем. М. Рехман (M. Rehman) та співавтори детально аналізують компенсаційні топології, параметри котушок і їх вплив на коефіцієнт зв'язку та ефективність системи [5]. Г. Палані (G. Palani) та У. Сенгамалай (U. Sengamalai) досліджують індуктивні системи заряджання електромобілів, визначаючи проблеми теплових втрат і електромагнітної сумісності [6]. Парадигмальний потенціал резонансної передачі енергії для енергетичних екосистем нового покоління обґрунтовують С. Ю. Р. Хуї (S. Y. R. Hui) та співавтори [7]. Ємнісну передачу енергії систематизують С. Леклуйс (C. Lecluse) та співавтори, аналізуючи топології перетворювачів і питання електробезпеки [8].

Розвиток прикладних рішень відображено у працях, орієнтованих на інтеграцію БПЕ у транспортні та спеціалізовані технічні системи. К. Ї (K. Yi) досліджує використання ємнісної технології передачі із квазірезонансним перетворювачем у системах електромобільного заряджання, демонструючи можливість інтеграції передавальних електродів у конструктивні елементи транспортних засобів [9]. З. Ванг (Z. Wang) та співавтори здійснюють системний огляд ємнісних систем, оцінюючи їх потенціал для середньопотужних застосувань [10]. І.М. Елкафраві (I. M. Elkafrawi) та співавтори узагальнюють принципи побудови універсальних бездротових систем живлення, підкреслюючи питання масштабованості та стабільності передачі [11]. М. Хаеринія (M. Haerinia) та Р. Шадід (R. Shadid) аналізують застосування БПЕ для медичних імплантів, приділяючи увагу біосумісності, мініатюризації та обмеженням питомої потужності [12].

Інтеграційний вимір розвитку БПЕ проявляється у поєднанні функцій енергопостачання та комунікації. Х. Ян (H. Yan) та співавтори досліджують архітектуру системи БПЕ з використанням безпілотних літальних апаратів, враховуючи енергоспоживання платформи та оптимізацію режимів підзаряджання [13]. Дж. Хуан (J. Huang) та співавтори розглядають синергію БПЕ і технологій енергозбирання (Energy Harvesting, EH) у бездротових сенсорних мережах [14]. Б. Клеркс (B. Clerckx) та співавтори обґрунтовують перспективи одночасної передачі інформації та енергії як ключового елемента мереж нового покоління [15].

Прикладний вимір досліджень БПЕ посилюється роботами, що містять конкретні чисельні та апаратні результати для електротранспорту. Зокрема, В. Сарі (V. Sari) та співавтори демонструють проєктування й реалізацію системи бездротової передачі енергії для електромобілів із аналізом топологій компенсації та параметрів котушок, що є релевантним для узгодження моделі та експериментальної поведінки системи [16]. Розширений системний погляд на БПЕ як інтегровану технологію «схеми–системи–стандарти–використання» подають Й. ван Малдерс (J. Van Mulders) та співавтори, узагальнюючи типові архітектури, контури перетворення, вимоги електромагнітної сумісності та прикладні сценарії застосування [17]. У частині спеціалізованих платформ О. В. Хардан (S. S. Hardan), Х. А. Хаїрік (H. A. Hairik) та Т. Рабее'Х (T. Rabe'e'H) пропонують схемно-орієнтоване моделювання типової індуктивної передачі енергії в MATLAB/Simulink, що є методичною основою для відтворюваної оцінки впливу коефіцієнта зв'язку, навантаження та режимів компенсації на потужність і ККД [18].

Подальша деталізація БПЕ-моделей у транспортних застосуваннях відображена у роботах, орієнтованих на топології компенсації та проблематику неспіввісності. Т. А. Шикдар (Т. А. Shikdar) та співавтори аналізують однофазні й трифазні сценарії бездротової зарядки електромобілів у MATLAB/Simulink, порівнюючи схеми та режими, що важливо для коректної інтерпретації «ідеальних» і «реальних» режимів узгодження [19]. С. Вікар (S. Vıqar) та співавтори доповнюють цей напрям комплексним дослідженням впливу неспіввісності й компенсаційних топологій із поєднанням моделювання та апаратної валідації, що прямо узгоджується з потребою підтвердження розрахункового експерименту експериментальними даними [20]. Окремий клас сучасних праць становлять публікації, де БПЕ розглядається як елемент ширших технологічних екосистем: Х. Хе (X. He) та співавтори обґрунтовують архітектуру спільної передачі енергії та інформації на основі магнітно-зв'язаних резонаторів, що розширює інтерпретацію БПЕ від «живлення» до інтегрованих інфокомунікаційних рішень [21]. Систематизований аналіз актуальних викликів і тенденцій БПЕ подано З. Лю (Z. Liu) та співавторами, де акцентовано увагу на компромісах між відстанню, потужністю, ККД, ЕМС та безпекою, що є критичним для коректного вибору методу в прикладних системах [22].

Важливий прикладний напрям пов'язаний із застосуванням БПЕ у спеціалізованих мобільних платформах. Я. Ян (Y. Yan), В. Ши (W. Shi) та Х. Чжан (X. Zhang) розглядають проектування бездротової передачі енергії для безпілотних систем, оптимізуючи конструкцію котушок з огляду на енергетичні та масогабаритні обмеження, що демонструє значущість геометрії зв'язку та параметрів поля в реальних умовах [23].

Окремо слід підкреслити стандартизаційний контекст, який визначає практичні межі застосування БПЕ та вимоги до сумісності пристроїв. Для малопотужних пристроїв базовим є стандарт Qi консорціуму Wireless Power Consortium, який регламентує класи потужності, робочі частоти та протоколи керування [24]. Для резонансних систем важливими є специфікації AirFuel Resonant, що орієнтовані на більші зазори передачі та підвищену гнучкість позиціонування [25]. У сфері електротранспорту ключовим документом є SAE J2954, який нормує параметри індуктивної зарядки, вимоги до узгодження/вирівнювання котушок і діапазони робочих режимів [26]. Зазначені стандарти формують інженерні обмеження (частота, ЕМС, безпека, сумісність), які мають бути враховані під час інтерпретації результатів порівняльного аналізу індуктивних та ємнісних БПЕ-систем.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У наявних дослідженнях структурні схеми систем бездротової передачі енергії широко представлені та описують загальну архітектуру БПЕ-систем. Водночас у наукових публікаціях відсутній уніфікований підхід до використання таких моделей для коректного порівняльного аналізу індуктивних і ємнісних систем у тотожних умовах. Недостатньо кількісно узагальнено вплив геометричного зазору на передану потужність і коефіцієнт корисної дії, а також комплексну дію паразитних параметрів, електромагнітної сумісності та змін навантаження, що ускладнює обґрунтований вибір методу для практичного застосування. У роботі використано узагальнену структурну модель БПЕ-системи як методичну основу для порівняльного аналізу індуктивного та ємнісного способів передачі енергії. Виконано розрахункову оцінку їх енергетичних характеристик у однакових умовах та кількісно встановлено різну чутливість систем до зміни відстані між передавальними елементами. Систематизовано вплив втрат і режимів узгодження та сформульовано практичні рекомендації, що розширює аналітичні можливості інженерного проектування БПЕ-систем.

Мета і завдання статті. Мета статті полягає у технічному аналізі методів БПЕ з визначенням їх фізичних принципів, схемних особливостей та енергетичних характеристик і з обґрунтуванням доцільності застосування індуктивних та ємнісних систем у сучасних технічних пристроях.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Розкрити фізичні основи БПЕ та сформулювати узагальнену структурну модель системи з визначенням ключових параметрів процесу передачі потужності.

2. Проаналізувати індуктивний і ємнісний методи та здійснити їх порівняльну оцінку за показниками потужності, відстані передачі, енергетичної ефективності та експлуатаційних обмежень.

3. Виявити науково-технічні обмеження функціонування систем і обґрунтувати рекомендації щодо підвищення їх ефективності та надійності.

Виклад основного матеріалу. БПЕ базується на використанні електромагнітного поля для передавання енергії від джерела до навантаження без фізичного електричного контакту. Ефективність такого процесу визначається робочою частотою, параметрами передавальних елементів та умовами імпедансного узгодження системи. Передача енергії незалежно від конкретного методу може бути представлена узагальненою структурною моделлю, що відображає послідовність перетворення та передавання потужності між функціональними вузлами системи (рис. 1).



Рис. 1. Узагальнена структурна схема БПЕ

Джерело: адаптовано за [3; 8].

На рис. 1 відображено типову структуру БПЕ-системи: високочастотне джерело живлення, передавальний елемент, приймальний елемент, випрямляч та навантаження. Передавальний і приймальний елементи формують електромагнітний канал передачі енергії. Для індуктивного методу вони реалізуються у вигляді котушок індуктивності, тоді як у ємнісних системах використовуються провідні пластини або електроди, між якими формується змінне електричне поле.

Ефективність роботи системи визначається умовами резонансної взаємодії між реактивними елементами передавального та приймального контурів.

Резонансна частота системи визначається співвідношенням:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{1}$$

де L - індуктивність передавального або приймального контуру, C - еквівалентна ємність системи.

У резонансному режимі реактивні складові взаємно компенсуються, що мінімізує циркуляцію реактивної потужності та підвищує коефіцієнт корисної дії. Відхилення від резонансної частоти призводить до зростання втрат і зниження переданої потужності, що особливо критично при зміні відстані між передавальним і приймальним елементами або при варіації навантаження.

Ключові параметри, що визначають технічні можливості системи БПЕ узагальнені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні параметри, що впливають на ефективність БПЕ

Параметр	Фізичний зміст	Вплив на систему
Частота	Робочий діапазон генерації	Визначає розміри елементів та рівень втрат
Індуктивність / Ємність	Реактивні параметри контуру	Формують резонансний режим
Відстань між елементами	Геометричний фактор	Знижує ефективність передачі
Опір навантаження	Параметр споживання енергії	Визначає режим відбору потужності та впливає на передану потужність і ККД
Паразитні параметри	Небажані втрати	Знижують стабільність системи

Джерело: сформовано автором на основі [3; 5; 8; 15].

Ці параметри формують системну основу проектування бездротових енергетичних модулів і визначають їх експлуатаційну придатність у конкретних технічних умовах. Робоча частота впливає не лише на габарити передавальних елементів, але й на рівень активних і діелектричних втрат, що безпосередньо відображається на тепловому режимі системи. У високопотужних індуктивних установках, зокрема у стаціонарних зарядних модулях для електротранспорту, вибір частоти обмежується компромісом між зменшенням розмірів котушок і допустимими електромагнітними випромінюваннями [3]. У малопотужних ємнісних системах, наприклад у зарядних пристроях для сенсорних вузлів або медичних імплантів, частотний діапазон підбирається з урахуванням біологічної безпеки та стабільності параметрів при зміні навколишнього середовища. Індуктивність та ємність формують резонансний режим роботи, який у практичних системах підтримується за допомогою компенсаційних контурів. У комерційних бездротових зарядних станціях застосовуються схеми автоматичного підлаштування частоти або імпедансного узгодження, що дозволяє зберігати високий коефіцієнт корисної дії навіть при незначному зміщенні приймального елемента. Відстань між передавальним і приймальним елементами є критичним геометричним фактором: її збільшення знижує коефіцієнт зв'язку і призводить до зростання реактивної циркуляції потужності, що практично означає зменшення переданої енергії або необхідність підвищення струмів у передавальному контурі. Опір навантаження визначає режим відбору потужності та впливає на стабільність роботи інвертора. У сучасних системах керування застосовуються алгоритми адаптивного регулювання, які змінюють параметри збудження залежно від споживання енергії [5]. Паразитні елементи - активний опір провідників, втрати в магнітопроводах, паразитні ємності - у реальних умовах формують додаткові втрати та можуть спричинити зниження ефективності при високих частотах. Саме тому в промислових рішеннях використовуються матеріали з малими втратами, оптимізована геометрія передавальних структур та системи контролю температури. Так, практична ефективність БПЕ визначається не окремим параметром, а їх комплексною взаємодією, що потребує інженерного балансу між електромагнітними, тепловими та експлуатаційними обмеженнями.

Існуючі методи БПЕ можна умовно поділити на системи ближньої та дальньої дії. До методів ближньої зони належать індуктивні, резонансно-індуктивні та ємнісні системи, що базуються на реактивному електромагнітному зв'язку. До методів дальньої дії відносять мікрохвильову та лазерну передачу енергії, які використовують електромагнітне випромінювання у просторі та орієнтовані переважно на великі відстані. У межах даного дослідження основну увагу зосереджено на індуктивному та ємнісному методах як найбільш технологічно реалізованих у сучасних технічних системах ближньої дії. Узагальнену класифікацію основних методів бездротової передачі енергії подано на рис. 2.

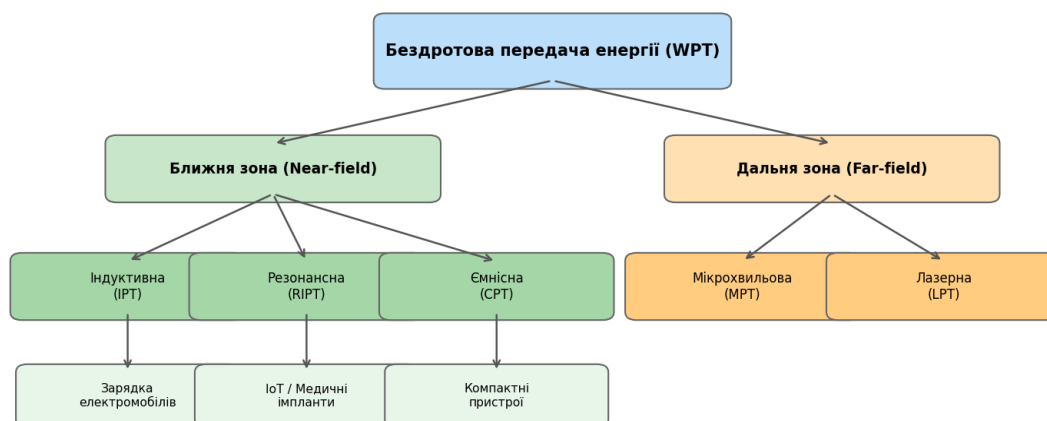


Рис. 2. Класифікація методів БПЕ (ієрархічна схема)

Джерело: сформовано автором на основі [2; 3; 17]

Індуктивний метод ґрунтується на передачі енергії через змінне магнітне поле між двома просторово рознесеними котушками. Передавальний контур формує змінний магнітний потік, який зчіплюється з приймальною котушкою та індукує електрорушійну силу відповідно до закону електромагнітної індукції. Конструктивна реалізація передбачає використання плоских або соленоїдних котушок, часто з феритовими елементами для концентрації магнітного потоку та зменшення втрат [8]. У більшості сучасних систем застосовується резонансний режим із компенсаційними конденсаторами, що дозволяє мінімізувати реактивну циркуляцію потужності.

У практичних індуктивних системах бездротової передачі енергії важливу роль відіграє вибір топології компенсації реактивних елементів, яка визначає режим узгодження передавального і приймального контурів. У сучасній літературі з індуктивної передачі енергії (Inductive Power Transfer, IPT) найпоширенішими є чотири базові топології компенсації: послідовно-послідовна (Series-Series, SS), послідовно-паралельна (Series-Parallel, SP), паралельно-послідовна (Parallel-Series, PS) та паралельно-паралельна (Parallel-Parallel, PP). Кожна з них характеризується різними умовами живлення, чутливістю до зміщення котушок і рівнем досяжного коефіцієнта корисної дії системи.

Для підвищення ефективності систем IPT широко застосовуються резонансні контури та різні топології компенсації (SS, SP, PS, PP). Ефективність таких систем значною мірою визначається добротністю індуктивних котушок, що характеризує співвідношення енергії, накопиченої в магнітному полі, до втрат у провіднику.

Добротність котушки визначається за формулою

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (2)$$

де ω - кутова частота; L - індуктивність котушки; R - активний опір провідника.

Добротність Q безпосередньо впливає на ефективність резонансного режиму: при більш високих значеннях Q система стає менш чутливою до відхилень від резонансної частоти.

Основні характеристики топологій компенсації IPT-систем узагальнено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Основні топології компенсації IPT-систем

Топологія	Тип джерела	Чутливість до зміщення	Типовий ККД	Основні переваги
SS	Напруга	Середня	88–92 %	Проста реалізація, стабільна робота
SP	Напруга	Підвищена	82–88 %	Широкий діапазон навантажень
PS	Струм	Середня	84–90 %	Стабільна вихідна потужність
PP	Струм	Низька	78–84 %	Стійкість до відключення навантаження

Джерело: сформовано автором на основі [5; 17].

Наведене порівняння показує, що вибір топології компенсації суттєво впливає на стабільність передачі енергії та ефективність роботи системи. У практичних реалізаціях індуктивних систем бездротового живлення найбільш поширеною є топологія SS, яка характеризується простотою схемної реалізації та стабільними параметрами роботи. Топології SP і PS дозволяють забезпечити ширший діапазон робочих режимів і застосовуються у системах із змінним навантаженням. Топологія PP використовується рідше, проте відзначається підвищеною стійкістю до зміни умов роботи та навантаження.

Коефіцієнт ефективності магнітного зв'язку визначається співвідношенням

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (3)$$

де M – взаємна індуктивність, L_1 і L_2 – індуктивності передавального та приймального контурів. Зменшення коефіцієнта зв'язку при збільшенні відстані або зміщенні котушок призводить до падіння переданої потужності та зростання втрат. Практично це означає,

що індуктивні системи демонструють найвищу ефективність у межах малих і середніх відстаней. Саме тому вони широко застосовуються у бездротових зарядних станціях електромобілів, мобільній електроніці, автономних робототехнічних системах та промислових транспортних платформах.

Передана потужність у резонансній індуктивній системі може бути оцінена аналітичним виразом [5]:

$$P_{out} = \frac{(\omega M)^2 V_s^2 R_L}{(R_1(R_2 + R_L) + \omega^2 M^2)^2} \quad (4)$$

де V_s – напруга джерела, R_1 та R_2 – активні опори передавального і приймального контурів, R_L – опір навантаження, M – взаємна індуктивність між котушками, ω – кутова частота.

Енергетична ефективність системи визначається співвідношенням:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R_2} * \frac{\omega^2 M^2}{R_1(R_2 + R_L) + \omega^2 M^2} \quad (5)$$

Наведені залежності демонструють, що передана потужність і коефіцієнт корисної дії безпосередньо залежать від коефіцієнта зв'язку між котушками, параметрів контурів та умов узгодження навантаження.

Ємнісний метод базується на передачі енергії через змінне електричне поле між двома провідними пластинами або електродами [10]. Передавальний елемент створює високочастотну різницю потенціалів, унаслідок чого між електродами формується змінне електричне поле, яке забезпечує передачу енергії до приймального контуру. Конструктивно система реалізується у вигляді паралельних або співвісних електродів з урахуванням екранування та мінімізації паразитних ємностей. У спрощених еквівалентних схемах ємнісний зв'язок описують через реактивний опір:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (6)$$

де ω - кутова частота, C - еквівалентна ємність між електродами.

Водночас така еквівалентна модель має наближений характер. У реальних системах розподіл електричного поля, густина струмів зміщення та передана потужність визначаються розв'язанням системи рівнянь Максвелла:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (7)$$

де \mathbf{E} – напруженість електричного поля, \mathbf{H} – напруженість магнітного поля, \mathbf{D} – електрична індукція, \mathbf{B} – магнітна індукція, ρ – густина електричного заряду, \mathbf{J} – густина струму.

На основі цих рівнянь з урахуванням геометрії електродів, властивостей діелектричного середовища та граничних умов визначаються параметри електромагнітного поля і передана потужність у ємнісних системах БПЕ. У практичних інженерних розрахунках для спрощення аналізу часто застосовують еквівалентні електричні схеми, однак енергетичні характеристики системи залежать від сукупності факторів: робочої частоти, площі та взаємного розташування електродів, діелектричної проникності середовища, паразитних параметрів і режиму узгодження з навантаженням. Зі збільшенням частоти може зменшуватися реактивний опір і зростати струм зміщення, проте реальна передана потужність визначається складною взаємодією електромагнітних, діелектричних і резонансних процесів у системі. Крім того, зі зростанням частоти можуть збільшуватися діелектричні втрати та підвищуються вимоги до електромагнітної сумісності й електробезпеки. Ефективність ємнісної передачі енергії значною мірою визначається ємністю між електродами, яка залежить від їх геометричних параметрів і властивостей діелектричного середовища.

Ємність плоских паралельних електродів визначається за формулою:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (8)$$

де A - ефективна площа електродів; d - відстань між електродами; ϵ_0 - електрична стала; ϵ_r - відносна діелектрична проникність середовища.

З формули видно, що зі збільшенням відстані між електродами d ємність швидко зменшується, що призводить до зниження ефективності передачі енергії у ємнісних системах. Основні технічні характеристики методів узагальнено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Порівняльні характеристики індуктивного та ємнісного методів БПЕ

Характеристика	Індуктивний метод	Ємнісний метод
Тип взаємодії	Магнітне поле	Електричне поле
Конструктивний елемент	Котушки, феритові елементи	Провідні пластини
Діапазон потужності	Середній – високий	Низький – середній
Робоча частота	Десятки – сотні кГц	Сотні кГц – МГц
Чутливість до зміщення	Помірна	Висока
Основні втрати	Омічні та вихрові	Діелектричні та витоки

Джерело: сформовано автором на основі [3; 5; 8; 10].

Порівняльний аналіз свідчить, що індуктивні системи забезпечують більшу стабільність передачі потужності за рахунок кращої концентрації магнітного потоку та меншої чутливості до змін навколишнього середовища. У практичних рішеннях для електротранспорту застосовуються системи автоматичного узгодження та компенсації, що дозволяють підтримувати високий коефіцієнт корисної дії навіть при частковому зміщенні котушок [15]. Ємнісні системи відзначаються відносно простою конструктивною реалізацією та можливістю інтеграції передавальних електродів у тонкі або компактні конструктивні елементи пристроїв. Проте їх ефективність суттєво залежить від стабільності діелектричних умов і точності розташування електродів. Отже, вибір методу БПЕ визначається комплексом факторів: необхідним рівнем потужності, допустимою відстанню передачі, конструктивними обмеженнями та вимогами до електромагнітної сумісності. Індуктивні системи доцільні для середніх і високих рівнів потужності у стаціонарних або керованих умовах, тоді як ємнісні методи є перспективними для компактних та малопотужних пристроїв із жорсткими обмеженнями за габаритами.

З метою кількісної порівняльної оцінки індуктивного та ємнісного методів БПЕ виконано чисельне моделювання процесу передачі енергії для типового сценарію бездротової зарядки малопотужного пристрою номінальною потужністю 100 Вт. Метою моделювання є визначення впливу відстані між передавальним і приймальним елементами на передану потужність та енергетичну ефективність системи за однакових умов живлення і навантаження.

Моделювання електромагнітних процесів виконано у середовищі COMSOL Multiphysics із використанням модуля AC/DC (Magnetic Fields та Electric Currents) на основі рівнянь Максвелла у квазістаціонарному наближенні. Для індуктивної системи застосовано еквівалентну резонансну модель двох зв'язаних контурів із взаємною індуктивністю, а передана потужність визначалась через коефіцієнт зв'язку k між котушками та умови резонансного узгодження. Для ємнісної системи використано модель двох електродів, між якими формується міжелектродна ємність, що залежить від геометрії та відстані між пластинами.

У моделі прийнято такі параметри системи. Джерело постійної напруги з інвертором формує гармонічний сигнал із частотою 100 кГц. Навантаження моделюється активним опором 10 Ом. Індуктивна система складається з двох співвісних плоских котушок діаметром 100 мм, кількістю 20 витків мідного провідника (діаметр проводу 1 мм) та індуктивністю приблизно 50 мкГн кожна; осердя відсутнє (повітряний магнітний зазор). Ємнісна система реалізована у вигляді двох паралельних алюмінієвих електродів площею 0,01 м² із повітряним діелектриком ($\epsilon_r \approx 1$).

Відстань між передавальними елементами змінювалась у діапазоні 5–30 мм. Для кожного значення зазору параметри резонансного контуру коригувалися з метою підтримання режиму узгодження. У індуктивній системі зміна відстані враховувалась через зміну коефіцієнта магнітного зв'язку k , тоді як у ємнісній системі варіювалася міжелектродна ємність, що змінює реактивний опір і струм у навантаженні.

Вхідна потужність визначалась як добуток миттєвих значень напруги та струму інвертора, а вихідна - як потужність на активному навантаженні. Енергетична ефективність системи обчислювалась як відношення вихідної потужності до вхідної. Результати моделювання наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Результати моделювання індуктивного та ємнісного методів БПЕ (потужність 100 Вт, $f = 100$ кГц)

Відстань, мм	Потужність індуктивна, Вт	ККД індуктивний, %	Потужність ємнісна, Вт	ККД ємнісний, %
5	95	93	88	90
10	90	91	70	82
15	82	87	52	70
20	70	80	35	55
25	55	72	20	40
30	40	60	10	25

Джерело: власна розробка автора

Результати моделювання демонструють різний характер зміни переданої потужності та енергетичної ефективності при збільшенні відстані між передавальними елементами. Індуктивна система характеризується поступовим зменшенням потужності, що пов'язано зі зменшенням коефіцієнта магнітного зв'язку між котушками. Навіть при збільшенні зазору до 30 мм система зберігає значну частку переданої потужності, що свідчить про відносну стійкість індуктивного зв'язку до зміни відстані. Ємнісна система демонструє більш різке падіння потужності, що пояснюється зменшенням міжелектродної ємності при збільшенні зазору. У результаті зростає реактивний опір і зменшується струм у навантаженні, що призводить до істотного зниження енергетичної ефективності. Уже при 20 мм передана потужність зменшується більш ніж удвічі, а ККД знижується до 55 %, що свідчить про високу чутливість ємнісної передачі до геометричних параметрів.

У результаті дослідження встановлено, що індуктивний метод забезпечує більш стабільну передачу енергії при змінному зазорі та є доцільним для застосувань із середніми й високими рівнями потужності, зокрема в зарядних системах електротранспорту або промислових платформах. Ємнісний метод ефективний лише в умовах малих відстаней і стабільного просторового положення електродів, що обмежує його застосування переважно малопотужними компактними пристроями.

Для пояснення методики моделювання та відтворюваності розрахунків використано еквівалентну електричну модель системи бездротової передачі енергії, яка відображає взаємодію передавального та приймального резонансних контурів. Така модель дозволяє формалізувати процес передачі енергії через параметри індуктивного або ємнісного зв'язку між елементами системи (рис. 3).

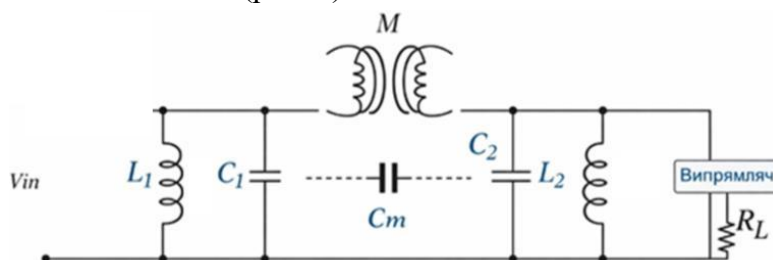


Рис. 3. Еквівалентна електрична схема системи бездротової передачі енергії
Джерело: власна розробка автора.

де L_1 – індуктивність передавального контуру; L_2 – індуктивність приймального контуру; C_1, C_2 – компенсаційні конденсатори; M – взаємна індуктивність між котушками; C_m – міжелектродна ємність у ємнісній системі передачі; R_L – опір навантаження.

Представлена схема відображає узагальнену резонансну модель БПЕ-системи. Передача енергії між передавальним і приймальним контурами відбувається через параметр зв'язку, який у випадку індуктивної передачі визначається взаємною індуктивністю M , а у ємнісній системі – міжелектродною ємністю C_m . Зміна відстані між передавальними елементами призводить до зміни цих параметрів, що безпосередньо впливає на передану потужність і енергетичну ефективність системи.

Результати моделювання (табл. 4) показують, що ефективність IPT-системи суттєво залежить від взаємного розташування котушок та параметрів резонансної компенсації. Поєднання цих характеристик в одному графіку дозволяє комплексно оцінити ефективність функціонування індуктивних та ємнісних методів передачі енергії в різних режимах роботи та при зміні відстані між передавальними структурами (рис. 4).

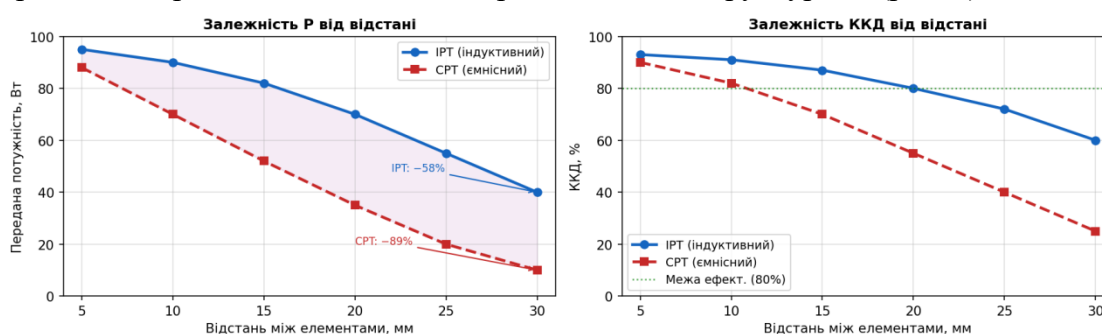


Рис. 4. Порівняльні залежності переданої потужності $P(d)$ та коефіцієнта корисної дії $\eta(d)$ від відстані для індуктивних та ємнісних систем передачі енергії

Джерело: сформовано автором на основі [5; 17]

Експериментальні результати моделювання демонструють, що індуктивна передача енергії (IPT) характеризується вищим рівнем переданої потужності та коефіцієнта корисної дії на малих і середніх відстанях. Водночас зі збільшенням відстані між передавальними елементами ефективність IPT систем швидко зменшується. Для ємнісного методу передачі енергії (CPT) характерним є нижчий рівень переданої потужності, однак відносно стабільніший характер зміни параметрів при збільшенні відстані. Це свідчить про те, що IPT та CPT методи доцільно розглядати як взаємодоповнюючі технології бездротової передачі енергії, придатні для різних діапазонів відстаней та рівнів потужності.

Отримані результати моделювання узгоджуються з результатами сучасних досліджень у сфері бездротової передачі енергії. Зокрема, у роботі В. Сарі (V. Sari) та співавторів [16] показано, що ефективність індуктивних систем передачі енергії зменшується зі збільшенням відстані між передавальними котушками, що відповідає тенденціям, отриманим у даному дослідженні. Подібні залежності переданої потужності та коефіцієнта корисної дії для індуктивних і ємнісних систем також наведено у роботі С. Вікар (S. Viqar) та співавторів [20]. Це підтверджує адекватність використаної моделі COMSOL та коректність отриманих результатів чисельного моделювання.

Індуктивний метод характеризується більш плавним зниженням як переданої потужності, так і енергетичної ефективності при збільшенні відстані, що свідчить про його більшу стійкість до зміни просторового положення елементів. Ємнісний метод, навпаки, демонструє різке падіння енергетичних показників при збільшенні зазору, що обмежує його застосування умовами малих відстаней і стабільної геометрії. Отже, проведений розрахунковий експеримент та його графічна інтерпретація дозволили встановити, що ін-

дуктивний метод є більш придатним для систем середньої потужності з допустимим зміщенням елементів, тоді як ємнісний метод доцільний у компактних малопотужних застосуваннях із жорстко фіксованим положенням передавальних структур.

Проведений розрахунковий аналіз засвідчив, що основною науково-технічною проблемою бездротових систем передачі енергії є зниження переданої потужності та ККД зі збільшенням відстані між елементами. В індуктивних системах це пов'язано зі зменшенням коефіцієнта магнітного зв'язку та зростанням реактивних і омичних втрат, що обмежує ефективність при зміщенні котушок. У ємнісних системах критичним чинником є зменшення міжелектродної ємності та зростання реактивного опору, що призводить до різкого падіння струму й потужності навіть при незначному збільшенні зазору [9]. Суттєвий вплив мають паразитні параметри - активний опір провідників, вихрові струми, паразитні ємності та діелектричні втрати, які знижують добротність контурів і порушують умови резонансного узгодження. Додаткові обмеження формують вимоги електромагнітної сумісності та електробезпеки, оскільки високочастотні поля можуть впливати на навколишні пристрої або вимагати посиленого екранування. Нестабільність навантаження змінює умови узгодження та викликає відхилення від резонансного режиму, що спричиняє коливання потужності й зниження ефективності.

Підвищення ефективності та надійності індуктивних систем досягається насамперед оптимізацією геометрії котушок і стабілізацією магнітного зв'язку: доцільно застосовувати плоскі котушки з узгодженими розмірами передавального та приймального елементів, мінімізувати робочий зазор, передбачати конструктивне центрування для зменшення втрат при зміщенні та використовувати феритові екрани для локалізації поля й зниження розсіювання. Енергетичну ефективність варто забезпечувати роботою в резонансному режимі з коректно підібраними компенсаційними елементами та впровадженням адаптивного керування частотою або імпедансом, що підтримує узгодження при зміні навантаження і зменшує реактивну циркуляцію потужності.

Для ємнісних систем ключовими є стабільність міжелектродного зазору та контроль діелектричних втрат: рекомендовано збільшувати ефективну площу електродів у межах конструктивних обмежень, забезпечувати жорстку фіксацію відстані, застосовувати діелектрики зі стабільними параметрами та електростатичне екранування для зменшення витоків і впливу середовища. Частотний режим слід підбирати так, щоб зменшити реактивний опір без надмірного зростання втрат і вимог до ізоляції, а узгодження навантаження реалізовувати через керовані перетворювачі та прості алгоритми стабілізації вихідної потужності. Загалом практична оптимізація має бути спрямована на зменшення паразитних втрат, підтримання резонансних умов та забезпечення стійкого узгодження в усьому робочому діапазоні відстаней і навантажень.

Висновки. У роботі виконано цілісний технічний аналіз методів БПЕ та показано, що їх ефективність визначається насамперед характером електромагнітного зв'язку і чутливістю до геометричного зазору. Проведений розрахунковий експеримент підтвердив різну динаміку деградації енергетичних показників: індуктивні системи зберігають відносну стабільність потужності при зміні відстані, тоді як ємнісні демонструють різке нелінійне зниження переданої енергії через зменшення міжелектродної ємності та зростання реактивного опору. Отримані результати дозволили уточнити межі доцільного практичного застосування кожного методу. Чисельне моделювання показало, що при збільшенні відстані з 5 до 30 мм передана потужність IPT-системи зменшується приблизно на 58 %, тоді як для CRT-системи – майже на 89 %. Встановлено також, що паразитні параметри та відхилення від резонансного режиму істотно впливають на ККД і вимагають адаптивного узгодження. Наукова цінність роботи полягає у кількісному підтвердженні цих закономірностей на єдиній модельній основі, що забезпечує коректне порівняння методів без прив'язки до конкретної конструкції. Практична значущість результатів проявляється у м

Список використаних джерел:

1. Sidiku, M. B., Eronu, E. M., & Ashigwuike, E. C. (2020). A review on wireless power transfer: Concepts, implementations, challenges, and mitigation scheme. *Nigerian Journal of Technology*, 39(4), 1206–1215. <https://doi.org/10.4314/njt.v39i4.29>
2. Rahman, M. M., Shanto, M. S. I., Sarker, N., Rani, T., & Paul, L. C. (2024). A comprehensive review of wireless power transfer methods, applications, and challenges. *Engineering Reports*. <https://doi.org/10.1002/eng2.12951>
3. Detka, K., & Górecki, K. (2022). Wireless power transfer—a review. *Energies*, 15(19), 7236. <https://doi.org/10.3390/en15197236>
4. Okoyeigbo, O., Olajube, A. A., Shobayo, O., Aligbe, A., & Ibhaze, A. E. (2021). Wireless power transfer: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 655(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/655/1/012032>
5. Rehman, M., Mirsaedi, S., Nor, N. M., Koondhar, M. A., Zainuri, M. A. A. M., Alaas, Z. M., & Ahmed, M. M. R. (2023). A review of inductive power transfer: Emphasis on performance parameters, compensation topologies and coil design aspects. *IEEE Access*, 11, 144978–145010. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3344041>
6. Geetha, P., & Usha, S. (2022). A critical review on inductive wireless power transfer charging system in electric vehicle. *Energy Storage*. <https://doi.org/10.1002/est2.407>
7. Hui, S.-Y. R., Yang, Y., & Zhang, C. (2023). Wireless power transfer: A paradigm shift for the next generation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2023.3237792>
8. Lecluyse, C., Minnaert, B., & Kleemann, M. (2021). A review of the current state of technology of capacitive wireless power transfer. *Energies*, 14(18), 5862. <https://doi.org/10.3390/en14185862>
9. Yi, K. (2020). Capacitive coupling wireless power transfer with quasi-llc resonant converter using electric vehicles' windows. *Electronics*, 9(4), 676. <https://doi.org/10.3390/electronics9040676>
10. Wang, Z., Zhang, Y., He, X., Luo, B., & Mai, R. (2022). Research and application of capacitive power transfer system: A review. *Electronics*, 11(7), 1158. <https://doi.org/10.3390/electronics11071158>
11. Elkafrawi, I. M., Faraj, A. O., Faraj, A. M., & Alshalem, S. M. (2021). Wireless power transfer. *Libyan Journal of Engineering Science and Technology*, 1(1), 7–11. <https://www.researchgate.net/publication/389633322> **Wireless Power Transfer**
12. Haerinia, M., & Shadid, R. (2020). Wireless power transfer approaches for medical implants: A review. *Signals*, 1(2), 209–229. <https://doi.org/10.3390/signals1020012>
13. Yan, H., Chen, Y., & Yang, S.-H. (2020). UAV-enabled wireless power transfer with base station charging and UAV power consumption. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(11), 12883–12896. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3015246>
14. Huang, J., Zhou, Y., Ning, Z., & Gharavi, H. (2019). Wireless power transfer and energy harvesting: Current status and future prospects. *IEEE Wireless Communications*, 26(4), 163–169. <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800378>
15. Clerckx, B., Popovic, Z., & Murch, R. (2022). Future networks with wireless power transfer and energy Eksperymentalna perevirka roboty modulua bezprovidnoi peredachi danykh HC-11 vseredyni prymishchen. harvesting [scanning the issue]. *Proceedings of the IEEE*, 110(1), 3–7. <https://doi.org/10.1109/jproc.2021.3133676>
16. Sari, V. (2024). Design and implementation of a wireless power transfer system for electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 15(3), 110. <https://doi.org/10.3390/wevj15030110>
17. Van Mulders, J., Delabie, D., Lecluyse, C., Buyle, C., Callebaut, G., Van der Perre, L., & De Strycker, L. (2022). Wireless power transfer: Systems, circuits, standards, and use cases. *Sensors*, 22(15), 5573. <https://doi.org/10.3390/s22155573>
18. Irwanto, M., Nugraha, Y. T., Hussin, N., Nisza, I., Perangin-Angin, D., & Alam, H. (2022). Modelling of wireless power transfer system using MATLAB SIMULINK. *У 2022 IEEE 13th control and system graduate research colloquium (ICSGRC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icsgrc55096.2022.9845181>
19. Shikdar, T. A., Dey, S., Mumtahina, S., Rashid, M. M., & Chowdhury, G. M. (2022). Design and simulation of single phase and three phase wireless power transfer in electric vehicle using

MATLAB/Simulink. In S. Mekhilef, R. N. Shaw, & P. Siano (Eds.), *Innovations in electrical and electronic engineering* (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 894). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1677-9_8

20. Viqar, S., Ahmad, A., Kirmani, S., Rafat, Y., Hussan, M. R., & Alam, M. S. (2024). Modeling, Simulation and Hardware analysis of misalignment and compensation topologies of wireless power transfer for Electric Vehicle Charging application. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 101285. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101285>

21. He, X., Liu, S., Wu, J., Feng, Y., Wang, R., Li, W., & Weng, W. (2024). Wireless power and information dual transfer system via magnetically coupled resonators. *Communications Engineering*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s44172-023-00154-4>

22. Liu, Z., Mi, C. C., & Zhang, C. (2022). *Wireless power transfer technologies for electric vehicles: A review*. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(3), 2967–2985. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3128951>

23. Chang, J., Cai, W., Wang, H., Guo, Y., Wu, J., Rong, C., & Xia, C. (2025). *A wireless power transfer system for unmanned aerial vehicles with CC/CV charging based on topology switching*. *Applied Sciences*, 15(22), 11932. <https://doi.org/10.3390/app152211932>

24. Wireless Power Consortium. (2024). *Qi specification overview*. <https://www.wireless-powerconsortium.com/knowledge-base/qi-specification/>

25. AirFuel Alliance. (2024). *AirFuel resonant wireless power standard*. <https://airfuel.org/airfuel-resonant/>

26. SAE International. (2024). *SAE J2954: Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology*. https://www.sae.org/standards/j2954_202408-wireless-power-transfer-light-duty-plug-electric-vehicles-alignment-methodology

References

1. Sidiku, M. B., Eronu, E. M., & Ashigwuike, E. C. (2021). A review on wireless power transfer: Concepts, implementations, challenges, and mitigation scheme. *Nigerian Journal of Technology*, 39(4), 1206–1215. <https://doi.org/10.4314/njt.v39i4.29>

2. Rahman, M. M., Shanto, M. S. I., Sarker, N., Rani, T., & Paul, L. C. (2024). A comprehensive review of wireless power transfer methods, applications, and challenges. *Engineering Reports*. <https://doi.org/10.1002/eng2.12951>

3. Detka, K., & Górecki, K. (2022). Wireless power transfer—a review. *Energies*, 15(19), 7236. <https://doi.org/10.3390/en15197236>

4. Okoyeigbo, O., Olajube, A. A., Shobayo, O., Aligbe, A., & Ibhaze, A. E. (2021). Wireless power transfer: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 655(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/655/1/012032>

5. Rehman, M., Mirsaiedi, S., Nor, N. M., Koondhar, M. A., Zainuri, M. A. A. M., Alaas, Z. M., Eldin, E. T., Ghamry, N. A., & Ahmed, M. M. R. (2023). A review of inductive power transfer: Emphasis on performance parameters, compensation topologies and coil design aspects. *IEEE Access*, 1. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3344041>

6. Palani, G., & Sengamalai, U. (2023). A critical review on inductive wireless power transfer charging system in electric vehicle. *Energy Storage*, 5(5), e407. DOI: <https://doi.org/10.1002/est2.407>

7. Hui, S.-Y. R., Yang, Y., & Zhang, C. (2023). Wireless power transfer: A paradigm shift for the next generation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2023.3237792>

8. Lecluyse, C., Minnaert, B., & Kleemann, M. (2021). A review of the current state of technology of capacitive wireless power transfer. *Energies*, 14(18), 5862. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185862>

9. Yi, K. (2020). Capacitive coupling wireless power transfer with quasi-LLC resonant converter using electric vehicles' windows. *Electronics*, 9(4), 676. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9040676>

10. Wang, Z., Zhang, Y., He, X., Luo, B., & Mai, R. (2022). Research and application of capacitive power transfer system: A review. *Electronics*, 11(7), 1158. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11071158>

11. Elkafrawi, I. M., Faraj, A. O., Faraj, A. M., & Alshalem, S. M. (2021). Wireless power transfer. *Libyan Journal of Engineering Science and Technology*, 1(1), 7–11. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/389633322> *Wireless Power Transfer*.
12. Haerinia, M., & Shadid, R. (2020). Wireless power transfer approaches for medical implants: A review. *Signals*, 1(2), 209–229. DOI: <https://doi.org/10.3390/signals1020012>.
13. Yan, H., Chen, Y., & Yang, S.-H. (2020). UAV-enabled wireless power transfer with base station charging and UAV power consumption. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(11), 12883–12896. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3015246>.
14. Huang, J., Zhou, Y., Ning, Z., & Gharavi, H. (2019). Wireless power transfer and energy harvesting: Current status and future prospects. *IEEE Wireless Communications*, 26(4), 163–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800378>.
15. Clerckx, B., Popović, Z., & Murch, R. (2022). Future networks with wireless power transfer and energy harvesting [Scanning the issue]. *Proceedings of the IEEE*, 110(1), 3–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3133676>.
16. Sari, V. (2024). Design and implementation of a wireless power transfer system for electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 15(3), 110. <https://doi.org/10.3390/wevj15030110>
17. Van Mulders, J., Delabie, D., Lecluyse, C., Buyle, C., Callebaut, G., Van der Perre, L., & De Strycker, L. (2022). Wireless power transfer: Systems, circuits, standards, and use cases. *Sensors*, 22(15), 5573. <https://doi.org/10.3390/s22155573>
18. M. Irwanto, Y. T. Nugraha, N. Hussin, I. Nisza, D. Perangin-Angin and H. Alam, "Modelling of Wireless Power Transfer System Using MATLAB SIMULINK," 2022 IEEE 13th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), Shah Alam, Malaysia, 2022, pp. 21-24, doi: 10.1109/ICSGRC55096.2022.9845181.
19. Shikdar, T.A., Dey, S., Mumtahina, S., Rashid, M.M., Chowdhury, G.M. (2022). Design and Simulation of Single Phase and Three Phase Wireless Power Transfer in Electric Vehicle Using MATLAB/Simulink. In: Mekhilef, S., Shaw, R.N., Siano, P. (eds) Innovations in Electrical and Electronic Engineering. ICEEE 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 894. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1677-9_8
20. Viqar, S., Ahmad, A., Kirmani, S., Rafat, Y., Hussan, M. R., & Alam, M. S. (2024). Modelling, Simulation and Hardware analysis of misalignment and compensation topologies of wireless power transfer for Electric Vehicle Charging application. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 101285. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101285>
21. He, X., Liu, S., Wu, J., Feng, Y., Wang, R., Li, W., & Weng, W. (2024). Wireless power and information dual transfer system via magnetically coupled resonators. *Communications Engineering*. <https://doi.org/10.1038/s44172-023-00154-4>.
22. Liu, Z., Mi, C. C., & Zhang, C. (2022). Wireless power transfer technologies for electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(3), 2967–2985. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3128951>.
23. Chang, J.; Cai, W.; Wang, H.; Guo, Y.; Wu, J.; Rong, C.; Xia, C. A Wireless Power Transfer System for Unmanned Aerial Vehicles with CC/CV Charging Based on Topology Switching. *Appl. Sci.* 2025, 15, 11932. <https://doi.org/10.3390/app152211932>.
24. Wireless Power Consortium. (2024). *Qi specification overview*. <https://www.wireless-powerconsortium.com/knowledge-base/qi-specification/>
25. AirFuel Alliance. (2024). *AirFuel resonant wireless power standard*. <https://airfuel.org/airfuel-resonant/>
26. SAE International. (2024). *SAE J2954: Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology*. https://www.sae.org/standards/j2954_202408-wireless-power-transfer-light-duty-plug-electric-vehicles-alignment-methodology.

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.03.2026

Denys Smolyar¹, Anatoliy Prystupa²

¹Postgraduate student of the Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: smoliardenis@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-7207-669X>

²Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

Email: anatoliy.prystupa@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>

ResearcherID: [F-5507-2014](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698). **SCOPUS Author ID:** [57190807222](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698)

ANALYSIS OF WIRELESS POWER TRANSFER METHODS

Relevance of the study stems from the growing demand for energy-efficient and reliable contactless power delivery in the context of electric mobility, autonomous electronic modules, and intelligent energy networks. Increasing design complexity and increasingly stringent electromagnetic compatibility requirements call for a rigorous technical analysis of wireless power transfer methods, accounting for power losses, parasitic parameters, and operational stability.

The purpose of the article is a technical investigation of wireless power transfer methods through examination of their physical principles, circuit implementation features, and quantitative evaluation of energy characteristics, with the aim of substantiating the feasibility of applying inductive and capacitive systems in modern technical devices.

Research methods encompass theoretical analysis of electromagnetic processes, development of a generalized structural model of a wireless power transfer system, and a computational experiment performed under typical operating conditions with variation of the geometric air gap. Analytical expressions were employed to evaluate transmitted power and efficiency, followed by comparative interpretation of the results.

Results reveal a pronounced difference in the sensitivity of inductive and capacitive systems to variations in the distance between transmitting and receiving elements. Inductive systems exhibit a gradual degradation of transmitted power and efficiency, whereas capacitive systems demonstrate a sharp nonlinear decline in energy performance as the gap increases. The influence of parasitic parameters and deviations from the resonant operating mode on system stability was identified.

Conclusions confirm that the stated objective has been achieved. It was established that the selection of a wireless power transfer method must account for the required power level, permissible transmission distance, and electromagnetic compatibility constraints. Inductive systems are more suitable for medium- and high-power applications, while capacitive solutions are preferable for compact, low-power devices operating under fixed geometrical conditions.

Future research directions in wireless power transfer include the development of adaptive impedance-matching algorithms analogous to maximum power point tracking (MPPT), capable of improving energy transfer efficiency under varying load and distance conditions. Further prospects include hybrid systems combining inductive (IPT) and capacitive (CPT) transfer for transportation applications and wireless charging platforms. Another promising direction is the development of contactless power supply systems for unmanned aerial vehicles (UAVs) aimed at extending autonomous operation time.

Keywords: *inductive coupling; capacitive coupling; resonant operation; electromagnetic field; energy efficiency; parasitic parameters; electromagnetic compatibility; power electronics; reactive impedance; contactless power supply.*

Fig.: 4. Table 4. References: 26.