

УДК 621.316.99

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.59>

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕЗОНАНСНОГО ІНДУКТИВНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА ДИНАМІЧНОЇ БЕЗДРОТОВОЇ ЗАРЯДКИ

Озерчук І. М. – провідний науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України
ORCID ID: 0000-0001-7011-0772

У статті представлено комбінований підхід до підвищення ефективності систем бездротової передачі енергії, інтегруючи резонансний індуктивний зв'язок із динамічною бездротовою зарядкою та оптимізоване управління енергією. Дослідження зосереджено на покращенні передачі енергії шляхом максимізації взаємної індуктивності та функціональності резонансних котушок у ближньому полі. Щоб досягти цього, були розроблені розширені компенсаційні мережі та алгоритми керування, які забезпечують точне налаштування резонансу та динамічну стабільність системи. Дослідження представляє математичну модель, що описує динамічний стан системи за допомогою резонансного рівняння передачі енергії, враховуючи резистивні втрати, реактивний зв'язок і нелінійності системи, забезпечуючи основу для аналізу взаємодії котушок і оптимізації параметрів індуктивного зв'язку. Взаємна індуктивність між котушками була додатково змодельована з використанням геометричних і матеріальних параметрів, а передача енергії була виражена як функція кутової частоти та струму передавача. Експериментальна установка була розроблена для перевірки теоретичної основи, зосереджуючись на динамічній зарядці для безпілотних наземних транспортних засобів (unmanned ground vehicles – UGV). Прототип системи включав масив котушок передавача, інтегрованих у тестову платформу, і котушку приймача, встановлену на UGV. Було перевірено кілька сценаріїв, включаючи різні швидкості транспортних засобів (0,5–2,0 м/с) і позиційні зміщення, щоб імітувати реальні умови експлуатації. Вимірювання ефективності проводилися за допомогою аналізатора потужності, що виявило зв'язок між коефіцієнтами зв'язку, факторами якості та ефективністю передачі енергії. Результати показали, що коефіцієнти високої якості та оптимальні коефіцієнти зв'язку значно підвищують ефективність передачі енергії, одночасно зменшуючи втрати. Система здатна підтримувати стабільну продуктивність, незважаючи на невеликі позиційні відхилення, що підкреслює її надійність. Крім того, було досліджено вплив геометрії котушки, просторового розподілу та властивостей матеріалу на напруженість і однорідність магнітного поля, підкреслюючи важливість конструкції котушки. Підсумовано, що запропонований підхід ефективно вирішує проблеми систем бездротової передачі енергії, особливо в динамічних сценаріях. Однак практичні міркування, такі як керування температурою та електромагнітні перешкоди, залишаються критично важливими для реалізації в реальному світі, що вимагає подальших досліджень для забезпечення надійних та масштабованих рішень.

Ключові слова: динамічна бездротова зарядка, взаємна індуктивність, геометрія котушки, UGV зарядка, електромагнітні перешкоди, резонансний індуктивний зв'язок.

Ozerchuk I. M. Enhancing efficiency in wireless power transfer systems using resonant inductive coupling and dynamic wireless charging

This article presents a combined approach to enhancing the efficiency of wireless power transfer (WPT) systems, integrating resonant inductive coupling with dynamic wireless charging and optimized energy management. The research focuses on improving energy transmission by maximizing mutual inductance and quality factors of resonant coils in near-field operation. To achieve this, advanced compensation networks and control algorithms were developed, enabling precise resonance tuning and dynamic system stability. The study introduces a mathematical model describing the system's dynamic state through a resonance energy transfer equation, accounting for resistive losses, reactive coupling, and system nonlinearities, providing a framework for analyzing coil interactions and optimizing inductive coupling parameters. The mutual inductance between coils was further modeled using geometrical and material

parameters, and the energy transfer was expressed as a function of angular frequency and transmitter current. An experimental setup was designed to validate the theoretical framework, focusing on dynamic charging for unmanned ground vehicles (UGVs). The prototype system included an array of transmitter coils integrated into a test platform and a receiver coil mounted on a UGV. Multiple scenarios were tested, including various vehicle speeds (0.5–2.0 m/s) and positional misalignments, to simulate real-world operating conditions. Efficiency measurements were conducted using a power analyzer, revealing the relationship between coupling coefficients, quality factors, and energy transfer efficiency. The results demonstrated that high-quality factors and optimal coupling coefficients significantly enhance energy transfer efficiency while mitigating losses. The system was capable of maintaining stable performance despite small positional deviations, highlighting its robustness. Additionally, the influence of coil geometry, spatial distribution, and material properties on magnetic field strength and uniformity was investigated, emphasizing the importance of coil design. The study concludes that the proposed approach effectively addresses the challenges of WPT systems, particularly in dynamic scenarios. However, practical considerations such as thermal management and electromagnetic interference remain critical for real-world implementations, necessitating further research to ensure reliable and scalable solutions.

Key words: dynamic wireless charging, mutual inductance, coil geometry, UGV charging, electromagnetic interference, resonant inductive coupling.

Постановка проблеми. Бездротова передача енергії представляє трансформаційну технологію, що пропонує інноваційні рішення для передачі енергії в різних сферах застосування, від побутової електроніки до електромобілів. Усуваючи фізичні роз'єми, бездротова передача енергії забезпечує підвищену зручність, зменшує знос компонентів і більшу адаптивність для динамічних систем. Однак її широкому впровадженню перешкоджають значні проблеми, зокрема енергоефективність, чутливість до вирівнювання та складність підтримки постійної подачі електроенергії в динамічних середовищах.

Одним із центральних питань у бездротовій передачі енергії є ефективне використання резонансного індуктивного зв'язку, де ефективність передачі сильно залежить від вирівнювання та близькості передавальної та приймальної котушок. Оскільки системи зростають у масштабі та ускладнюються, як, наприклад, у випадку динамічної зарядки для транспортних засобів, що рухаються, ці виклики стають ще більш помітними. Запровадження передових компенсаційних мереж і алгоритмів керування спрямоване на усунення цих обмежень, але практичні реалізації все ще мають проблеми з втратами енергії та впливом неідеальних умов, таких як зміщення та вплив навколишнього середовища.

Крім того, динамічні системи бездротової зарядки, які спрямовані на підтримку передачі енергії під час руху, привносять додаткові інженерні складності. Вони включають синхронізацію кількох передавачів, налаштування в режимі реального часу для зміни позицій приймача та потребу в точному налаштуванні резонансу. Вирішення цих проблем вимагає інноваційних конструкцій, які поєднують передові геометрії котушок, оптимізовані параметри резонансу та інтелектуальні стратегії керування.

З цієї причини у даній роботі розглядається комбінований підхід, який поєднує резонансний індуктивний зв'язок із динамічною бездротовою зарядкою та оптимізоване управління енергією. Використовуючи досягнення в конструкції котушок, налаштуванні резонансу та стратегіях динамічного керування.

Мета дослідження – розробка системи бездротової передачі енергії в умовах динамічної зарядки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] представлено розробку та аналіз системи бездротової передачі енергії з магнітним механізмом, призначеної для заряджання електромобілів. Дослідженням вивчається використання

масивів Хальбаха і здійснюється їх продуктивності із звичайними магнітними конфігураціями. Дослідження зосереджено на вирішенні критичних проблем у бездротовій зарядці електромобілів, включаючи допуск до вирівнювання, втручання сторонніх предметів та ефективність передачі енергії.

Було розроблено та випробувано прототип системи магнітного редуктора бездротової передачі енергії, який містить решітку Хальбаха для підвищення щільності магнітного потоку в цільових областях, мінімізуючи потік у небажаних областях. Експериментальні результати показали, що масив Хальбаха досяг передачі потужності 34,65 Вт з ефективністю передачі 64% через зазор 104 мм, тоді як звичайний масив магнітів досяг більш високої передачі потужності 88 Вт за аналогічних умов. Проте система Хальбаха продемонструвала значно зменшене вплив сторонніх об'єктів, про що свідчить зменшення магнітного тяжіння до сусідніх об'єктів із заліза.

Крутий момент, створений між передавальним і приймальним масивами магнітів, був апроксимований за допомогою теоретичної моделі, заснованої на законі Біо-Савара, і результати підтверджено за допомогою експериментальних вимірювань. Крім того, система бездротової передачі енергії на базі Хальбаха була інтегрована в персональний мобільний EV-скутер, що забезпечує бездротову зарядку з унікальним радіальним кутом з'єднання 360°. Така конфігурація забезпечувала ефективну передачу енергії незалежно від орієнтації скутера відносно зарядної станції.

Дослідження підкреслює переваги роботи на низьких частотах, зменшення електромагнітних перешкод і покращений допуск до вирівнювання, пов'язаних із системами бездротової передачі енергії з магнітними передачами. Незважаючи на багатообіцяючі результати, такі проблеми, як неефективність двигуна, втрати на тертя та оптимізація магнітного масиву, були визначені як області для вдосконалення. Подальша робота буде досліджувати гібридні магнітні механізми, розширені системи керування для динамічного балансування навантаження та покращення конструкції котушок і магнітів для максимізації ефективності та масштабованості.

У межах роботи [2] представляються розробка та експериментальна валідація системи електрично резонансної бездротової передачі енергії (electrically resonant wireless power transfer – ERWPT), спрямованої на подолання обмежень систем магнітно-резонансної бездротової передачі енергії (magnetically resonant wireless power transfer – MRWPT). Запропонована система ERWPT використовує відкриту біфілярну котушку на резонансній частоті, що забезпечує середню бездротову передачу потужності до 50 Вт з максимальною ефективністю передачі потужності (PTE – power transfer efficiency) 46% на відстані 2 метри. Дослідження досліджує внутрішні відмінності між бездротовою передачею енергії на основі магнітних і електричних полів шляхом повторного перегляду рівнянь Максвелла та аналізу проблем у досягненні узгодженого PTE у MRWPT. На відміну від систем на основі магнітного поля, система ERWPT використовує монопольну здатність електричних зарядів, забезпечуючи рівномірний PTE по бічній площині (площині x_y) незалежно від розташування приймача.

Були проведені експерименти, щоб оцінити продуктивність системи за різних орієнтацій і положень приймача. Результати продемонстрували послідовний PTE в різних бічних розташуваннях і дали зрозуміти варіації в Z-напрямку через паразитні ємності та резонансні зрушення частоти. Нова конфігурація відкритої біфілярної котушки була розроблена для досягнення точної компенсації індуктивності,

що має вирішальне значення для сильного електричного резонансу на певних частотах. Було розроблено детальну модель схеми, щоб пояснити бажані та паразитні шляхи струму, підкреслюючи їхній вплив на резонансну поведінку та ефективність системи.

Експериментальна установка використовувала великі мідні пластини як джерела поля та включала послідовну схему з навантажувальними пристроями, такими як світлодіоди та галогенні лампи, для перевірки можливостей системи передачі електроенергії. Технології вимірювання забезпечили точну ізоляцію ефектів бездротової передачі енергії шляхом пом'якшення перешкод від ненавмисних провідних шляхів. Дослідження завершується демонстрацією здатності системи ERWPT сприяти гнучкій і ефективній бездротовій передачі енергії, встановлюючи її як перспективну альтернативу системам MRWPT для практичного застосування.

Крім того, варто зазначити праці наступних науковців: Н. Саваяма [3], С. Лінь, Ю. Сунь, В. Ян [4], М. Ерел, Т. Імтіаз, А. Ельсанабарі, М. Мубін, К. Тей, С. Мехілеф [5], К. Крішнамурті, М. Сангета [6], Д. Степінс, Я. Закіс [7], Ю. Лі, Х. Ван, Ю. Чжай, Л. Чжу, Б. Юань, С. Лі [8], С. Хао, К. Ін, С. Цай, Ц. Цзоу, Р. Ван, С. Ма, Ц. Цзе, Т. Дун [9], Ц. Ян, Х. Чжан, Ц. Лі, Р. Лю, Б. Ван [10], Е. Білгіч, Х. Білгіч, Е. Кантаоглу [11], К. Якуб'як, Ц. Лян, Л. Ципсіган, Ц. Лі, Д. Ву [12], М. Амірі, С. Джаваді, Х. Заріні, М. Мілі, Дж. Ан, М. Сухак, І. Крікідіс [13], А. А. Мохамед, А. Шаєр, Х. Метваллі, С. Селем [14], Ю. Тянь, В. Гуань, Г. Лі, К. Мехран, Дж. Тянь, Л. Сян [15] та інших.

Спираючись на окреслену джерельну базу, слід зазначити, що проблема оптимізації ефективності процесів бездротової передачі енергії залишається актуальною і водночас недостатньо дослідженою. Незважаючи на значний прогрес у розробці новітніх методів і технологічних рішень, які сприяють підвищенню ефективності таких систем, низка аспектів усе ще потребує більш детального вивчення. Зокрема, це стосується удосконалення параметрів передачі, мінімізації енергетичних втрат, забезпечення стабільності роботи систем у різних умовах експлуатації, а також вирішення технічних викликів, пов'язаних із взаємодією між передавальними та приймальними пристроями. Виходячи з цього, проблема оптимізації бездротової передачі енергії потребує подальшого ґрунтовного дослідження, яке передбачає як експериментальну, так і теоретичну роботу, що дозволить не лише розширити сучасну наукову базу, а й сприяти практичному застосуванню отриманих результатів у різних галузях.

Виклад основного матеріалу дослідження. З метою підвищення ефективності систем бездротової передачі електроенергії, був запропонований комбінований підхід, який за своєю суттю інтегрує резонансне індуктивне coupling з динамічною бездротовою зарядкою та оптимізованим керуванням енергії. Основа даного методу полягає у структурі роботи резонансних котушок у режимі ближнього поля, де здійснюється максимізація двосторонньої індуктивності та фактору якості задля забезпечення сильного зв'язку між передавачем та приймачем.

Поставлена мета дослідження досягається за посередництва компенсаційних мереж та контрольних алгоритмів. Динамічний стан системи описується завдяки рівнянню резонансної передачі енергії:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \alpha Q + \beta \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} = \gamma |Q|^2 Q \quad (1)$$

де α відповідає опорним втратам, β відображає реактивний зв'язок, яка базується на взаємозв'язку між контурами котушок передавача та приймача, які працюють на частотах, яка є близькою до їхньої резонансної частоти, γ моделює нелінійності системи.

Взаємодія даних контурів описується через індуктивний взаємний вплив та параметри резонансу. Індуктивний зв'язок виражається таким чином:

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{d^3} \quad (2)$$

де M – взаємна індуктивність, μ_0 – магнітна проникність вакууму, N_1 і N_2 – число витків котушок передавача та приймача відповідно, A – площа витка, а d – відстань між котушками. Енергія, що передається через напругу V виражається наступним чином:

$$V = j\omega MI \quad (3)$$

де ω – кутова частота, I – струм у котушці передавача.

Даний зв'язок характеризується двосторонньою індуктивністю M та індивідуальними індуктивностями L_1 та L_2 . За умови резонування котушок на однаковій кутовій частоті $\omega_0 = 1/LC$, де L відповідає індуктивності котушки та C являє собою резонансну ємність, підвищуються якісні характеристики електричного струму. Ефективність η в умовах ідеального резонансного індуктивного зв'язку репрезентується таким чином:

$$\eta = 1 + \frac{k^2 Q_1 Q_2}{k^2 Q_1 Q_2} \quad (4)$$

де $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$ позначає коефіцієнт зв'язку, у той час, як Q_1 та Q_2 відповідають факторам якості на відповідних котушках. Шляхом вибору котушок з високими показниками факторів якості та забезпечення умови, що k залишатиметься в межах оптимального діапазону, здійснюється зменшення втрат. У той же час, значення $k^2 Q_1 Q_2$ має бути достатньо високим, задля встановлення системи в області, де частка енергії, що передається навантаженню, є максимальною. Якщо Q є занадто високим за наявності помірного зв'язку, система може стати чутливою до малих неузгодженостей; якщо зв'язок є сильно високим, але котушки мають низьке значення Q , домінуватимуть опірні втрати.

Магнітний резонанс може бути поширений у контексті багатокотушкових матриць, де декілька котушок передавача мають однакову резонансну частоту, але є окремо керованими, або зсуваються по фазі з метою створення конструктивних перешкод в області приймача. У такому випадку, чиста передана енергія відповідає сумі внесків з кожної котушки, при умові, що поля кожної котушки ефективно перекриваються з приймачем. Фактор просторового паралелізму P_s визначається з метою репрезентації комбінованого ефекту декількох котушок передавача:

$$P_s = \prod_{i=1}^N (1 + k_i) \quad (5)$$

де k_i відповідає коефіцієнту зв'язку між котушками передавача та приймача та N являє собою кількість котушок передачі. Загальна ефективність зростає коли використовуються зв'язкові внески з кількох котушок.

Схема керування енергією, яка контролює активацію котушок передавача, побудована за принципом пікомережевої структури, згідно з якою один головний

пристрій здійснює координацію декількох інших пристроїв, ти чином передбачаючи, що кожна станція котушки передавача може вігравати роль головного вузла. Модуль котушки приймача оперує в ролі підпорядкованого вузла, який здійснює узгодження передачі від одного передавача до іншого з урахуванням зміни позиції. При цьому, активаційне вікно головної котушки та рівень енергії є запланованими задля відповідності позиції котушки приймача.

Концепція просторового паралелізму передбачає, що підвищення кількості ефективних шляхів може надати більш ефективну пропускну здатність. У контексті бездротової передачі, такі додаткові шляхи відповідають багатьом резонуючим котушкам, які функціонують скоординовано. На практиці, встановлення такої структури вимагає керування амплітудою та фазою струму у кожній котушці, підтримку постійного резонансу та забезпечення умови, що жодний зв'язок котушки з навколишнім середовищем не став причиною перехресного зв'язку.

Стаціонарні зарядні платформи постають в якості контрольованих середовищ, де узгодження котушок залишається відносно постійним. У даному сценарії, центральна проблема полягає у максимізації продукту $k^2 Q_1 Q_2$ та конструюванні схема для підтримки проведення, діелектричних та змінних втрат низькими. Передавач типово складається з високочастотного джерела енергії, яке здійснює збудження LC контуру, під'єданого до головної котушки. Вторинна схема у межах приймача, також налаштована для резонування на тій самій частоті, або близько неї, потім завантажується у заряджуваний пристрій. Дане навантаження репрезентується завдяки імпедансу Z_L , відображення якого у контур котушки керується за допомогою відповідних ланцюгів. Мета полягає у забезпеченні відповідності дійсної частини відображеного імпедансу розрахунковій точці котушки для досягнення максимальної передачі потужності. Впровадження впливу котушкових опорів R_1 та R_2 модифікує загальну ефективність η_t :

$$\eta_t = \left(\frac{1 + \omega M R_1 + R_2}{k^2 Q_1 Q_2} \right)^2 + k^2 Q_1 Q_2 \quad (6)$$

Динамічне бездротове заряджання розширює статичну резонансну індуктивну концепцію на системи, в яких одна з котушок перебуває в русі, як це відбувається з електромобілями, що рухаються по зарядних доріжках. Щоб полегшити надійну роботу під час безперервного руху, кілька передавальних котушок, розміщених вздовж доріжки, вибірково активуються так, що рухома приймальна котушка залишається в зоні ближнього поля принаймні одного передавача в будь-який момент часу. Миттєва потужність, що передається за такої динамічної схеми, залежить від коефіцієнта зв'язку в реальному часі $k(t)$ між активним передавачем і приймачем:

$$k(t) = \alpha e^{-\beta(x(t)-x_0)^2}$$

де α являє собою пік зв'язку, β являє собою параметр, пов'язаний з просторовою чутливістю зв'язку, а $x(t)$ є миттєвим положенням приймача відносно положення передавача x_0 . Такий гаусівський профіль вказує на те, що коли приймальна котушка щільно вирівнюється з заданою котушкою педавача, $k(t)$ наближається до свого максимуму, тоді як коли приймач виходить за межі діапазону, зв'язок швидко зменшується.

Враховуючи описану концепцію, геометрична оптимізація котушок та прайвильний вибір матеріалів безпосередньо впливають на характер бездротової

передачі енергії, оскільки від форми, розміру та просторового розподілення витків залежить сила та однорідність генерованого магнітного поля, а також коефіцієнт зв'язку між котушками передавача та приймача. У контексті геометрії котушок, базове рішення стосується у використанні або розподіленого, або концентрованого патернів намотування. Розподілений патерн намотування полягає у поширенні витків по більшій області, який є використовуваним у контексті потенційних позиційних зсувів котушки приймача, як наприклад у фіксованих зарядних панелей у побутовій електроніці. Ширше покриття забезпечує залишення приймача у межах ефективного діапазону принаймні однієї котушки передавача, підтримуючи постійну передачу енергії незалежно від малих неузгоджень. З іншого боку, патерн концентрованого намотування, при якому витки є щільно упакованими біля центру котушки надають більшу інтенсивність поля у межах меншої просторової ділянки. Впровадження феритових екрануючих пластин за котушками сприяє фокусуванню магнітного поля до приймача та мінімізації небажаних викидів у інші напрямки.

Зворотний зв'язок у реальному часі щодо продуктивності котушок та умов їх оточення досягається шляхом інтеграції п'єзоелектричних сенсорів у систему. Дані сенсори здійснюють виявлення механічних навантажень та вібрацій, конвертуючи їх у малі електричні заряди, які живлять низькоенергетичні комунікаційні модулі. Зібраний заряд з п'єзоелектричного елементу моделюється таким чином:

$$\Delta Q = d\sigma A_p$$

де d відповідає п'єзоелектричній константі, σ – прикладеному навантаженню, A_p є активною ділянкою сенсора. Дані сенсори здійснюють забезпечення інформацією про узгодження котушок, температурних варіацій та інших релевантних параметрів.

Задля емпіричної валідації запропонованого комбінованого підходу для оптимізації систем бездротової передачі енергії, була розроблена експериментальна установка, яка зосереджується на динамічні зарядці безпілотної наземного транспорту (unmanned ground vehicles – UGVs). Дана установка впроваджує резонансний індуктивний зв'язок з динамічною бездротовою зарядкою. Установка включає масив котушок передавача, інтегрований у тестову платформу та котушку приймача у структурі UGV прототипу. Передавальні котушки розташовані таким чином, щоб створювати зону постійного заряджання.

UGV було налаштовано на проходження доріжки на різних швидкостях, починаючи від 0.5 до 2.0 м/с, задля симуляції різних операційних сценаріїв. При кожному додаванні швидкості, здійснювалося вимірювання ефективності передачі з використанням аналізатора потужності Yokogawa WT500. Дослідження впливу неправильного узгодження на ефективність енергопередачі, були запроваджені контрольні відхилення у траєкторію UGV. Бічні відхилення були спричинені зміщенням траєкторії UGV перпендикулярно центральній лінії гусениці з кроком 5 сантиметрів, максимум до 20 сантиметрів. Вертикальні зміщення моделювалися шляхом регулювання висоти котушки приймача відносно котушок передавача з додаванням 2 сантиметрів, максимум до 8 сантиметрів. У кожній позиції зміщення реєструвалася ефективність передачі потужності, задля визначення чутливості системи до позиційних розбіжностей.

Експериментальні результати демонструють чіткий взаємозв'язок між коефіцієнтом зв'язку, факторами якості та ефективністю енергопередачі. Як було передбачено, ефективність знижується по мірі підвищення відстані між котушками

через редукцію у взаємній індуктивності. Зміщувальні тести розкривають потенціал системи до витримання малих позиційних відхилень.

Враховуючи те, що експериментальна установка підтверджує теоретичну складову дослідження, мають бути розглянутими певні практичні міркування щодо температурного керування системи, оскільки наявні компоненти мають схильність до значного нагрівання під час роботи, потенційно впливаючи на подальшу ефективність. Електромагнітні перешкоди також становлять проблему, особливо з урахуванням масштабування системи з приділенням уваги до адаптації конструкції котушок, вибору матеріалу та протоколів безпеки.

Висновки. Підсумовуючи, запропонований метод вирішує критичні проблеми енергоефективності, чутливості вирівнювання та динамічної роботи, демонструючи значний крок вперед у створенні надійних систем бездротової передачі енергії. Аналіз підкреслює важливість оптимізації геометрії котушки, параметрів резонансу та алгоритмів керування для забезпечення високої продуктивності як у статичних, так і в динамічних умовах. Експериментальні результати підтверджують ефективність цього підходу, особливо в сценаріях динамічного заряджання для безпілотних наземних транспортних засобів, де ефективність системи залишається стабільною, незважаючи на зміни позиції та вирівнювання.

Тим не менш, реалізація у реальному повинна враховувати обмеження матеріалів, керування температурою та електромагнітні перешкоди, які можуть поставити під загрозу надійність і ефективність системи. З цієї причини необхідні подальші вдосконалення для забезпечення сталої продуктивності в широкому діапазоні робочих умов. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на вирішенні практичних завдань, таких як управління температурою та електромагнітними перешкодами, щоб підвищити надійність і масштабованість систем бездротової передачі енергії. Використовуючи досягнення в матеріалознавстві, стратегіях управління та архітектурі системи, запропонована структура закладає основу для більш широкого впровадження бездротової передачі енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Dunlap C., Van Neste C. W. Magnetic gear wireless power transfer system: Prototype and electric vehicle charging. *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 532. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18020532>.
2. Lee B., Kim J., Jo H., Min H., Bien F. Arrangement free wireless power transfer via strongly coupled electrical resonances. *Advanced Science*. 2024. Vol. 12. DOI:10.1002/advs.202407827.
3. Sawayama N. Maximum power transfer theorem with arbitrary efficiency for wireless power transfer. *Physica Scripta*. 2024. Vol. 100. DOI:10.1088/1402-4896/ad96fa.
4. Lin C., Sun Y., Yang W. Brief introduction to wireless power transfer. *Wireless rechargeable sensor networks for Internet of Things. Wireless networks*. Singapore : Springer, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-9543-7_2.
5. Erel M., Intiaz T., Elsanabary A., Mubin M., Tey K. S., Mekhilef S. Enabling quadruple-D compensation coil integration for efficient power transfer to receiver in wireless power transfer systems for EV charging. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2025. DOI:10.1109/JESTPE.2025.3525594.
6. Krishnamoorthy K., Sangeetha M. Wireless power transfer. *Semiconductor Optoelectronics*. 2023. Vol. 42. No. 1. P. 1296–1306.
7. Stepins D., Zaķis J. Bezvadu elektroenerģijas pārvade (Wireless power transfer). Rīga : RTU Press, 2024. 68 p. DOI: <https://doi.org/10.7250/9789934370359>. ISBN 978-9934-37-035-9.

8. Li Y., Wang H., Zhai Y., Zhu L., Yuan B., Li X. High degree of freedom limited omnidirectional wireless power transfer and reconfigurable method. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2025. P. 1–1. DOI:10.1109/JESTPE.2025.3525733.
9. Hao X., Yin K., Cai S., Zou J., Wang R., Ma X., Tse C., Dong T. Dispersive gains enhance wireless power transfer with asymmetric resonance. *ArXiv* : website. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2408.06913.
10. Yang Q., Zhang H., Li C., Liu R., Wang B. Illumination design for joint imaging and wireless power transfer systems. *ArXiv* : website. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2408.00368.
11. Bilgiç E., Bilgiç H., Kantaroglu E. Wireless power transfer systems and wireless charging design between electric vehicles. *Journal of Computer & Electrical and Electronics Engineering Sciences*. 2024. Vol. 2. P. 56–61. DOI:10.51271/JCEES-0019.
12. Jakubiak K., Liang J., Cipcigan L., Li C., Wu J. Simplified modelling techniques for dynamic wireless power transfer. *Preprints* : website. 2024. DOI:10.20944/preprints202409.1231.v1.
13. Amiri M., Javadi S., Zarini H., Mili M., An J., Sookhak M., Krikidis I. Stacked intelligent metasurface for simultaneous wireless information and power transfer. *ResearchGate* : website. 2024. DOI:10.13140/RG.2.2.26138.04804.
14. Mohamed A. A., Shaier A. A., Metwally H., Selem S. I. Wireless charging technologies for electric vehicles: Inductive, capacitive, and magnetic gear. *IET Power Electron.* 2024. Vol. 17. P. 3139–3165.
15. Tian Y., Guan W., Li G., Mehran K., Tian J., Xiang L. A review on foreign object detection for magnetic coupling-based electric vehicle wireless charging. *Green Energy Intell. Transp.* 2022. Vol. 1.

REFERENCES:

1. Dunlap, C., & Van Neste, C. W. (2025). Magnetic gear wireless power transfer system: Prototype and electric vehicle charging. *Energies*, 18, 532. <https://doi.org/10.3390/en18020532> [In English].
2. Lee, B., Kim, J., Jo, H., Min, H., & Bien, F. (2024). Arrangement free wireless power transfer via strongly coupled electrical resonances. *Advanced Science*, 12. <https://doi.org/10.1002/advs.202407827> [In English].
3. Sawayama, N. (2024). Maximum power transfer theorem with arbitrary efficiency for wireless power transfer. *Physica Scripta*, 100. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad96fa> [In English].
4. Lin, C., Sun, Y., & Yang, W. (2025). Brief introduction to wireless power transfer. In *Wireless rechargeable sensor networks for Internet of Things. Wireless networks* (pp. 1–21). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9543-7_2 [In English].
5. Erel, M., Imtiaz, T., Elsanabary, A., Mubin, M., Tey, K. S., & Mekhilef, S. (2025). Enabling quadruple-D compensation coil integration for efficient power transfer to receiver in wireless power transfer systems for EV charging. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2025.3525594> [In English].
6. Krishnamoorthy, K., & Sangeetha, M. (2023). Wireless power transfer. *Semiconductor Optoelectronics*, 42(1), 1296–1306. [In English].
7. Stepins, D., & Žakis, J. (2024). *Bezvadu elektroenerģijas pārvade (Wireless power transfer)*. Riga: RTU Press. <https://doi.org/10.7250/9789934370359> [In English].
8. Li, Y., Wang, H., Zhai, Y., Zhu, L., Yuan, B., & Li, X. (2025). High degree of freedom limited omnidirectional wireless power transfer and reconfigurable method. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2025.3525733> [In English].

9. Hao, X., Yin, K., Cai, S., Zou, J., Wang, R., Ma, X., Tse, C., & Dong, T. (2024). Dispersive gains enhance wireless power transfer with asymmetric resonance. *ArXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.06913> [In English].
 10. Yang, Q., Zhang, H., Li, C., Liu, R., & Wang, B. (2024). Illumination design for joint imaging and wireless power transfer systems. *ArXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.00368> [In English].
 11. Bilgiç, E., Bilgiç, H., & Kantaroglu, E. (2024). Wireless power transfer systems and wireless charging design between electric vehicles. *Journal of Computer & Electrical and Electronics Engineering Sciences*, 2, 56–61. <https://doi.org/10.51271/JCEES-0019> [In English].
 12. Jakubiak, K., Liang, J., Cipcigan, L., Li, C., & Wu, J. (2024). Simplified modelling techniques for dynamic wireless power transfer. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202409.1231.v1> [In English].
 13. Amiri, M., Javadi, S., Zarini, H., Mili, M., An, J., Sookhak, M., & Krikidis, I. (2024). Stacked intelligent metasurface for simultaneous wireless information and power transfer. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26138.04804> [In English].
 14. Mohamed, A. A., Shaier, A. A., Metwally, H., & Selem, S. I. (2024). Wireless charging technologies for electric vehicles: Inductive, capacitive, and magnetic gear. *IET Power Electronics*, 17, 3139–3165. [In English].
 15. Tian, Y., Guan, W., Li, G., Mehran, K., Tian, J., & Xiang, L. (2022). A review on foreign object detection for magnetic coupling-based electric vehicle wireless charging. *Green Energy Intelligent Transportation*, 1. [In English].
-