

## Аналітичний огляд технологій бездротової зарядки для електромобілів

Буряківський В. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Стаття присвячена технологіям бездротової зарядки для електромобілів. Досліджуються сучасні методи, принципи роботи та переваги бездротової зарядки, спрямовані на підзарядку акумуляторів електромобілів. Огляд включає у себе аналіз основних технологій, таких як індуктивна зарядка, магнітно-резонансна зарядка та інші методи, що використовуються в цій галузі. Також розглядаються тенденції розвитку технологій бездротової зарядки, їх недоліки та можливості в майбутньому. Цей аналітичний огляд допоможе розуміти стан та перспективи бездротової зарядки для електромобілів та визначити напрямки подальших досліджень у цій сфері.

**Ключові слова:** електроенергія, електромобіль, бездротова зарядка, індуктивна зарядка, магнітно-резонансна зарядка, передача енергії, індукція.

### Вступ

За останні десятиліття спостерігається стрімкий розвиток технологій у сфері електромобілів, що відіграє ключову роль у поступовому переході від традиційних заправних станцій до електричних зарядних пунктів.

Однак, при всіх досягненнях, проблема заряджання залишається однією з найважливіших при поширенні електромобілів [1]. У зв'язку з цим бездротова технологія зарядки електромобілів набуває особливого значення, спонукаючи до активного дослідження та розробок у цьому напрямку [2]. Переходячи до безпроводних систем зарядки, можна розширити зручність та ефективність використання електромобілів, зменшуючи зусилля водіїв при пошуку та підключенням до зарядних станцій. Ця робота присвячена вивченню актуальних проблем та перспектив розвитку бездротової зарядки електромобілів. Дослідження цього напрямку має вирішальне значення у зміцненні та подальшому розвитку інфраструктури для електромобілів. Результати цього дослідження стимулюватимуть розробку нових технологій та систем бездротової зарядки, спрямованих на підвищення їх ефективності, зручності в експлуатації та доступності для користувачів.

Ці дослідження дозволять зосередитися на

конкретних технічних аспектах, таких як оптимізація передачі енергії, розширення діапазону заряджання та розвиток інтелектуальних систем керування заряджанням. Їхні результати відіграють важливу роль у сприянні переходу на більш сталий та ефективний транспорт, сприяючи розвитку та поширенню електромобілів як ключового компонента майбутнього автомобільного ринку.

### Аналіз публікацій

Популярність електромобілів (EV) стрімко зросла в останні роки, оскільки все більше людей усвідомлюють вплив традиційних двигунів внутрішнього згоряння на навколишнє середовище [3]. Однак однією з проблем, яка все ще перешкоджає масовому впровадженню електромобілів, є доступність та зручність зарядної інфраструктури.

У роботі [4] автори статті розглянули розвиток методів бездротової передачі електроенергії для електромобілів. Автори визначили досягнення, виклики і перспективи цієї технології, оцінили різні системи бездротової зарядки.

Автори статті [5] дослідили останні тенденції у бездротовій передачі енергії для електромобілів. Вони оглядають нові технології та методи, які застосовуються для підвищення ефективності та зручності заряджання елект-

ромобілів. Окрім цього, в цій публікації представлено інформацію про різні системи бездротового заряджання та їхні переваги, що підтверджує сучасних підходів до бездротового заряджання.

В статті [6] розглядаються останні тенденції в галузі бездротової зарядки електромобілів (EV), зокрема, технології рухомого заряджання. Автори статті виділяють два типи бездротової зарядки EV: статичну і динамічну.

Автори роботи [7] аналізують стаціонарну бездротову зарядку та її різноманітні модифікації. Вони розглядають основні характеристики та ключові аспекти цієї технології. Аналіз спрямований на вивчення основних принципів та можливостей бездротової стаціонарної зарядки.

У статті [8] представлено огляд результатів опитування, проведеного серед користувачів електромобілів (EV) для оцінки їхнього ставлення до бездротової зарядки EV. Опитування було проведене в Китаї у 2018 році, і в ньому взяли участь 500 користувачів EV. Узагальнено, користувачі EV висловлюють позитивне ставлення до бездротової зарядки. Автори вважають, що бездротова зарядка є більш зручною, безпечною та ефективною, ніж традиційна контактна зарядка.

Автори статті [9] провели огляд технологій динамічної бездротової зарядки електромобілів. Робота включає в себе інформацію про різні методи передачі енергії, типи зарядних пристроїв і системи, а також потенційні переваги та недоліки динамічної бездротової зарядки.

В публікації [10] автори провели огляд стану галузі бездротової зарядки електромобілів, станом на 2023 рік. Робота включає в себе інформацію про різні технології бездротової зарядки EV, а також потенційні переваги та виклики цієї технології.

Проведений аналіз публікацій показав, що на сьогоднішній час технології бездротової зарядки для електромобілів включають індуктивну зарядку, магнітну резонансну зарядку та радіочастотну зарядку. Ці методи використовують магнітне поле або радіочастотні хвилі для передачі електроенергії між зарядною станцією та автомобілем, забезпечуючи зручність та можливість заряджання без підключення проводів. Чітко простежується, що технології продовжують розвиватися для покращення ефективності та збільшення відстані заряджання.

### **Мета та постановка задачі**

Метою роботи є аналіз та обґрунтування сучасних технологій бездротової зарядки для електромобілів, шляхом висвітлення різних методів бездротового заряджання, їхніх переваг та недоліків, а також оцінюванням потенційного впливу на розвиток електромобілів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз індуктивної, магнітно-резонансної та радіочастотної технологій бездротової зарядки для електромобілів;
- визначити переваги та недоліки кожного методу бездротового заряджання, враховуючи ефективність, швидкість зарядки, вартість, та інші ключові аспекти;
- зробити висновки щодо практичного застосування та майбутні перспективи бездротової зарядки для електромобілів.

### **Технології зарядки**

Сьогодні світ рухається до електрифікованої мобільності, щоб запропонувати альтернативу дорогому паливу для транспорту та мінімізувати викиди забруднюючих речовин, що створюються автомобілями на невідновлюваному викопному паливі [11]. Однак для електромобілів двома основними проблемами, які перешкоджають їхньому впровадженню у порівнянні зі звичайними транспортними засобами, є дальність пробігу та процедури заряджання [12].

Принцип роботи трансформатора та бездротової зарядки ідентичний. Бездротова зарядка використовує передавач і приймач. Котушка передавача отримує високочастотний змінний струм від джерела змінного струму 220 В 50 Гц. Високочастотний змінний струм створює змінне магнітне поле, яке перериває котушку приймача і дозволяє котушці приймача генерувати змінний струм. Однак для функціонування бездротової зарядки резонансна частота передавача і приймача повинна залишатися постійною. Для збереження цієї резонансної частоти в обох аспектах реалізовані компенсаційні мережі [13]. Крім того, система керування акумулятором подає випрямлений постійний струм, що генерується з боку приймача, який підключений до акумулятора. На рис. 1 показаний метод бездротової зарядки.

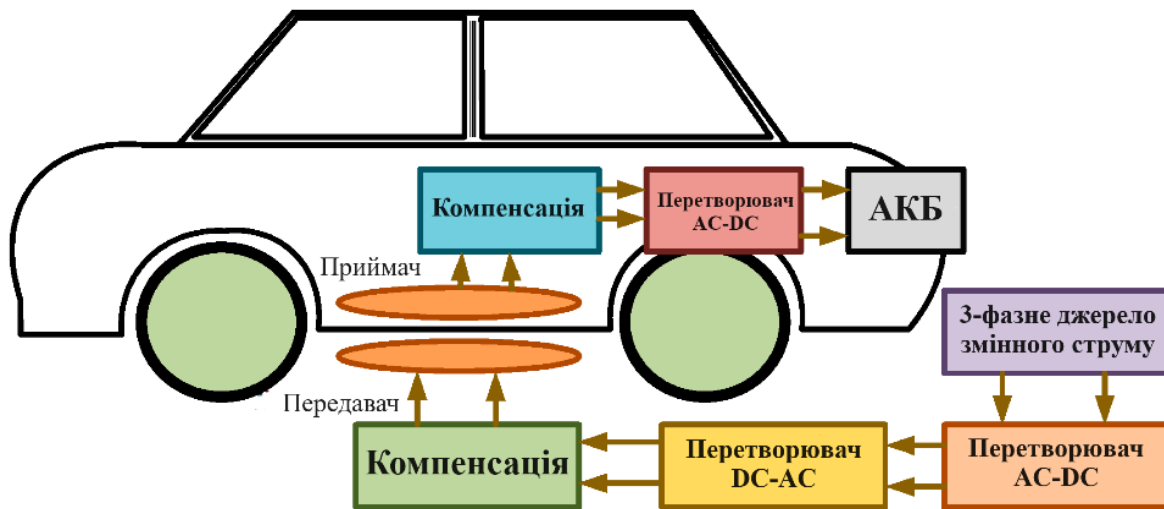


Рис. 1. Система бездротової зарядки [6]

### Основний принцип дії бездротової системи зарядки для електромобілів

Електрична енергія передається від передавальної котушки до приймальної котушки. Цей процес включає конвертацію змінного струму з мережі в високочастотний змінний струм. Це досягається за допомогою пристроїв, які спершу перетворюють змінний струм на постійний за допомогою перетворювача змінного струму на постійний (AC/DC), а потім знову на змінний струм за допомогою перетворювача постійного струму на змінний (DC/AC). Для покращення загальної ефективності системи включено топологію компенсації на передавальній і приймальній сторонах, засновану на комбінаціях послідовного і паралельного з'єднань. Приймальна котушка, зазвичай встановлена під автомобілем, перетворює коливальні магнітні потоки високочастотного змінного струму. Потім високочастотний змінний струм перетворюється у постійний струм відповідно до необхідних параметрів, які використовуються для зарядки вбудованих акумуляторів. Також включено систему керування потужністю, зв'язку та управління акумуляторами (BMS), щоб уникнути будь-яких проблем зі здоров'ям та безпекою та забезпечити стабільну роботу. На обох сторонах передавача і приймача використовуються магнітні феритові пластини для зменшення будь-яких шкідливих витоків потоку та покращення розподілу магнітного потоку [14, 15]. Основна блок-схема статичної системи бездротової зарядки для електромобілів показана на рис. 2.



Рис. 2. Принципова блок-схема статичної бездротової зарядної системи для електромобілів [14]

### Ємнісний метод бездротової передачі енергії

Ємнісний метод бездротової передачі енергії (CWPT – Capacitive Wireless Power Transfer) – це технологія, що перекладається як бездротова передача потужності через конденсатори. Ця технологія виявляє високу економічну ефективність та простоту використання для середніх і малопотужних пристроїв, портативної електроніки і зарядних пристроїв для телефонів. Вона використовує покращені механічні конфігурації та геометричні схеми, такі як конденсатори зв'язку, що робить її дуже вигідною [16]. Усередині CWPT для передачі енергії від приймача до джерела використовуються конденсатори зв'язку, а не котушки або магніти. Напівмостові перетворювачі отримують первинну змінну напругу через схему контролю якості електроенергії. Схема ємнісного методу бездротової передачі енергії представлена на рис. 3.

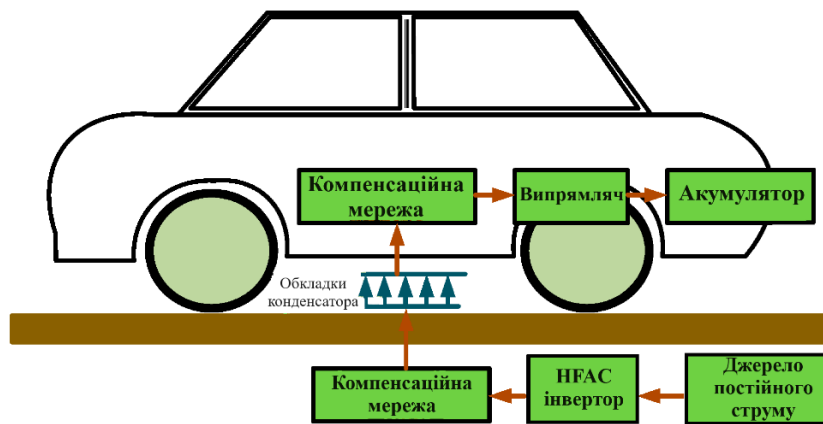


Рис. 3. Схематичне зображення ємнісного методу бездротової передачі електроенергії [6]

Конденсатори зв'язку на стороні приймача передають змінний струм, створений H-образним мостом, на високу частоту. На відміну від індуктивного бездротового передавання енергії (IPT), SWPT працює на мінімальному і максимальному струмі [17].

Крім того, щоб зменшити діапазон значень опору в системі передачі, в резонансній конфігурації додаткові котушки індуктивності повинні бути з'єднані тільки з тією комбінацією, яка присутня в конденсаторах зв'язку. Враховуючи це, можна інтегрувати м'яке перемикання в схему. Схеми випрямлячів і фільтрів використовуються для перетворення вхідного змінного струму в постійний для навантаження або акумуляторної батареї. Дві змінні, що впливають на рівень передачі потужності, – це "розмір конденсатора зв'язку" і "відстань між його двома пластинами". Технологія бездротової передачі енергії через магнітне спрямування (SWPT) відзначається відмінними характеристиками та забезпечує кращі обмеження магнітного поля для невеликих повітряних проміжків, що утворюються між пластинами двох конденсаторів.

З моменту свого впровадження технологія SWPT була лише частково застосована в електромобілях через значні потреби у високій потужності та повітряних проміжках. На робочій частоті 540 кГц було представлено статичний дослідницький прототип з вихідною потужністю понад 1 кВт і коефіцієнтом корисної дії приблизно 83% (від джерела живлення постійного струму до акумуляторної батареї).

Бездротова передача енергії між передавачем і приймачем можлива завдяки використанню струму зміщення, який створює змінне

електромагнітне поле. У цьому випадку в якості передавача і приймача для бездротової передачі енергії замість магнітів або котушок використовуються конденсатори зв'язку.

Напруга змінного струму подається на схему регулювання складової коефіцієнта потужності для покращення діапазону ефективності, підтримання рівня напруги та зменшення втрат при передачі. Високочастотне джерело змінного струму подається на передавальну пластину, створюючи коливальне електричне поле, яке через електростатичну індукцію виробляє струм зміщення на приймальній пластині. Після цього він подається на напівміст для генерації та підвищення максимальної напруги змінного струму. Змінна напруга з боку приймача перетворюється на постійну і використовується для живлення або заряду акумуляторної батареї в усій системі управління батареєю за допомогою фільтрів і пристрою для випрямлення. Напруга, частота, розмір і ємність конденсатора зв'язку, а також повітряний зазор між передавальною та приймальною сторонами впливають на потужність, що передається. Частота передачі знаходиться в діапазоні від 100 кГц до 600 кГц.

Ємнісний метод бездротової передачі енергії характеризується своєю простотою та ефективністю у використанні для малих пристроїв із низьким споживанням енергії, що становить його суттєву перевагу. Однак його обмеження у відстані передачі енергії та потужності робить його менш відповідним для великих пристроїв чи тих, що потребують значної енергії. Крім того, SWPT може бути вразливим до зовнішніх перешкод, які впливають на продуктивність передачі енергії [18, 19].

### Бездротовий метод передачі електроенергії за допомогою магнітів у системах бездротової зарядки

Магнітна передача електроенергії відрізняється від СВРПТ та індуктивної передачі потужності своєю особливою методикою передачі, яка базується на використанні магнітних полів, як показано на рис. 4.

У цьому методі використовуються два паралельно синхронізованих постійних магніти (РМ).

Обмотка передавача отримує основне джерело живлення, оскільки джерело струму змушує первинний РМ відчувати силу механічного крутного моменту.

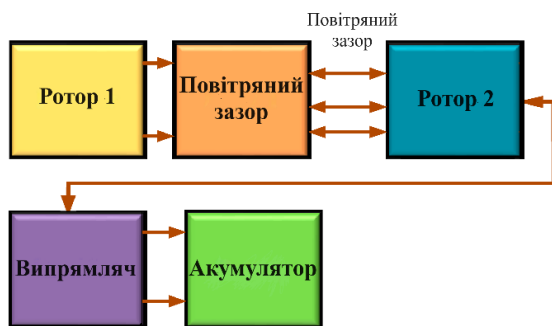


Рис. 4. Метод бездротової передачі за допомогою магнітів [6]

Первинний РМ обертається та механічно взаємодіє з вторинним РМ для застосування крутного моменту, використовуючи механічний крутний момент. Функціонування в режимі генератора здійснюється за допомогою основного постійного магніту такої комбінації синхронних постійних магнітів. У свою

чергу, вторинний постійний магніт збирає енергію та передає її до батареї через електронний перетворювач потужності та систему керування батареєю [20].

До недоліків цього методу можна віднести наступні:

- невисока ефективність. Ефективність магнітної передачі електроенергії зазвичай становить близько 70%. Це означає, що 30% електроенергії, що передається, втрачається в вигляді тепла;

- обмежена відстань передачі. Відстань, на яку можна передавати електроенергію з використанням магнітної передачі, зазвичай становить кілька метрів. Для передачі електроенергії на більші відстані необхідно використовувати більш потужні магнітні поля, що може призвести до підвищення втрат і небезпеки для здоров'я людини;

- небезпека для здоров'я людини. Магнітне поле, яке використовується для передачі електроенергії, може мати негативний вплив на здоров'я людини. Однак, згідно з дослідженнями, вплив магнітного поля, що використовується в бездротових зарядних пристроях, є безпечним для здоров'я людини.

### Індуктивний метод передачі енергії

У 1914 році Нікола Тесла значно вплинув на розвиток концепцій бездротової передачі енергії, які стали фундаментом для подальших технологій, таких як індуктивна передача потужності (IPT). На рис. 5. показана принципова блок-схема традиційного IPT.

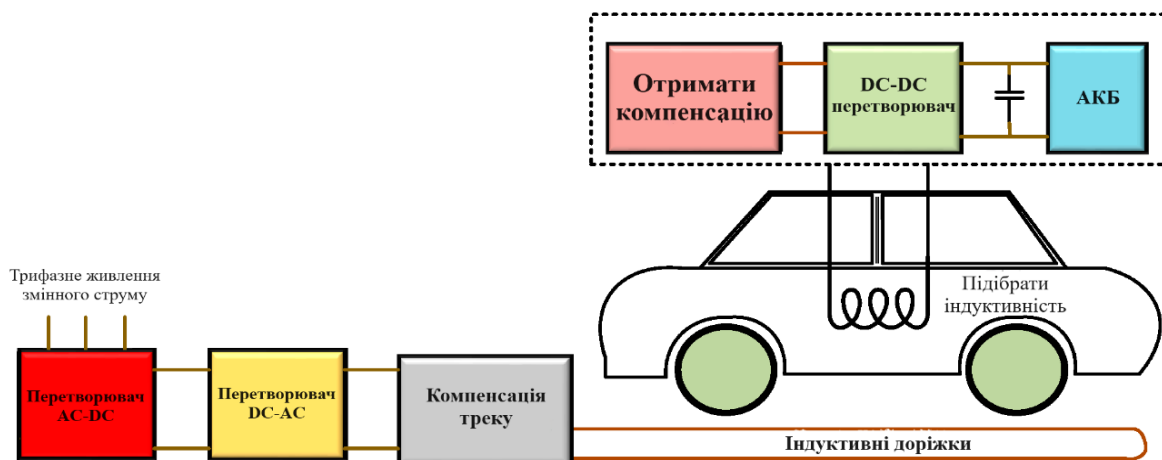


Рис. 5. Індуктивний спосіб передачі енергії [6]

Кілька систем зарядки електромобілів вплинули на неї. IPT була оцінена і реалізована в деяких системах, починаючи від мВт до кВт для безконтактної передачі сили від джерела до приймача. У 1996 році відомий виробник автомобілів General Motors представив Chevrolet S10 EV. Для його живлення використовувалася система магнітного заряду IPT (J1773), що надавала можливість зарядки з різними рівнями потужності: повільно (6,6 кВт) і швидко (50 кВт).

Катушка з магнітним зарядом першого ступеня – це зарядний пристрій, який містить індуктивний з'єднувач (зарядний пропелер). Ця катушка вставляється в зарядний порт автомобіля. Вона відправляє енергію через індукцію до вторинної катушки, що дозволяє заряджати транспортний засіб.

Основною передумовою IPT є індукція за законом Фарадея. Електроенергія передається бездротовим способом за допомогою взаємної індукції магнітного поля між передавальною та приймальною катушками. Коли на катушку передавача подається змінний струм, магнітна область змінного струму, яка проходить через неї і транспортує електрони, створює потужність змінного струму. Акумулятор електромобіля заряджається цим випрямленим і відфільтрованим вихідним змінним струмом. Частота, взаємна індуктивність і відстань між катушками передавача і приймача впливають на кількість переданої та отриманої електроенергії. IPT використовує діапазон частот від 19 кГц до 50 кГц [21].

### Резонансна індуктивна бездротова система зарядки

Резонансна індуктивна бездротова система зарядки (RIWC) є технологією, яка базується на використанні резонансу для безпроводної передачі електроенергії між пристроями.

Незалежно від слабших магнітних полів, робота в резонансному режимі дозволяє перемикати таку ж кількість електроенергії, як і в IPT, оскільки резонатори з додатковою ємністю передають електроенергію з набагато більшим зарядом. Енергію можна передавати на великій відстані без використання кабелів - резонансна індуктивна бездротова система зарядки показана на рис. 6.

Найбільш значна потужність, яка може передаватися повітрям, відбувається тоді, коли резонансні частоти (смуга пропускання) сторін котушок поширення (передавача) і прийому

(приймача) котушок узгоджені, або коли котушки передавача і приймача регулюються [22].

Для досягнення відповідних резонансних частот послідовно і паралельно катушкам передавача і приймача підключаються додаткові компенсаційні мережі.

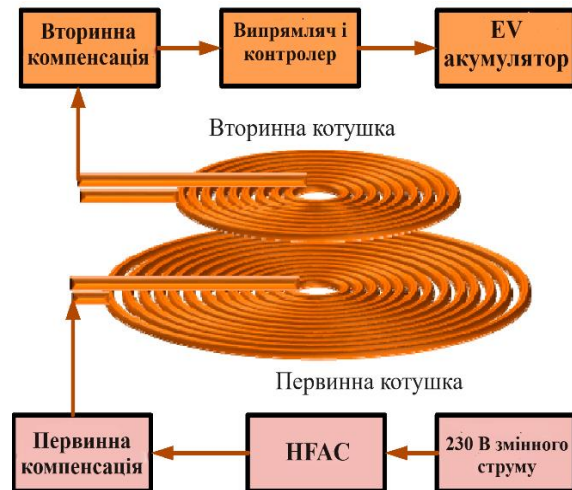


Рис. 6. Резонансна індуктивна система бездротової зарядки [6]

Разом зі збільшенням резонансної частоти ці додаткові компенсаційні мережі також допомагають зменшити додаткові втрати. Робоча частота резонансної індуктивної бездротової системи знаходиться в діапазоні від 10 кГц до 150 кГц [23].

### Статична та динамічна бездротова зарядка

Бездротові системи зарядки електромобілів поділяються на дві категорії, залежно від застосування:

- статична бездротова зарядка: включає в себе методи, такі як RIWC, CWPT та IPT;
- динамічна бездротова зарядка: також використовує методи, такі як RIWC та CWPT для бездротового заряджання електромобілів під час руху.

Метод статичної бездротової зарядки передбачає заряджання автомобіля кожного разу, коли він перебуває у статичному режимі, як показано на блок-схемі статичної бездротової зарядки на рис. 7.

Таким чином, електромобіль можна було б легко припаркувати в певному місці або в сховищі, що дозволяло б взаємодіяти з бездротовою системою зарядки що спрощує та забезпечує процес зарядки автомобіля без необхід-

ності використання кабелів чи проводів. Передавач буде розташований під землею, а приймач під кузовом автомобіля. Перед тим, як вийти з автомобіля для завершення зарядки, водій повинен вирівняти передавач і

приймач. Простір між краями передавача і приймача, розмір їхніх прокладок і сила подачі змінного струму впливають на швидкість заряджання [24-25].

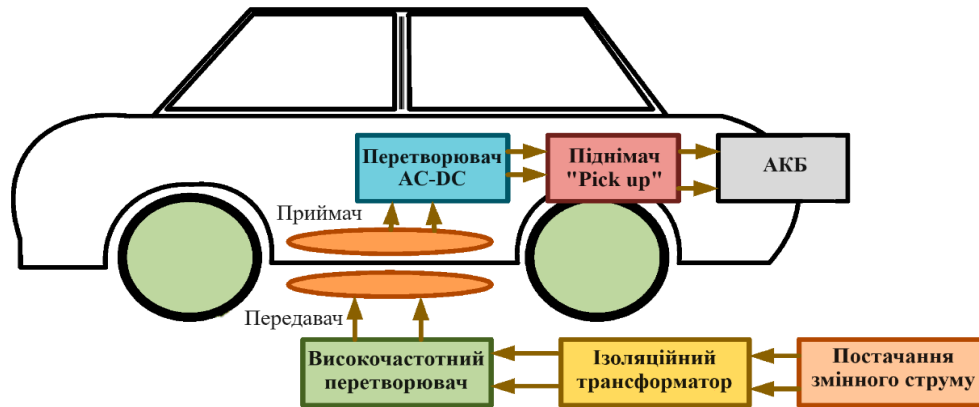


Рис. 7. Метод статичної бездротової зарядки [6]

Найкраще будувати зарядні станції там, де електромобілі регулярно паркуються на тривалий час.

Динамічна бездротова зарядка використовується для підзарядки електромобілів під час руху, що робить непотрібним очікування, поки батарея зарядиться. Ця теорія, висунута в 1978 році Дж. Г. Болгером та ін., стверджує, що енергія передається транспортному засобу під час його руху. Динамічна бездротова зарядка електромобілів вирішує проблеми обмеженого діапазону поїздок і необхідності частого заряджання на зарядних станціях. Індуктивна бездротова передача енергії використовується в сучасних пристроях динамічної бездротової зарядки. Ця технологія базується на котушці-приймачі, встановленій в електромобілі, яка отримує електромагнітне поле, що генерує високочастотний струм, і котушках, прихованих під дорожнім покриттям [26]. Дорожні котушки постійно подають живлення на котушку-перехоплювач протягом усього шляху.

Після відповідної підготовки батарею електромобіля можна заряджати струмом, який передається цією котушкою. Для передачі енергії до інтегрованої системи з котушкою-передавачем і кількома резонаторами були створені малопотужні бездротові системи. Однак, оскільки вони слідує за траєкторією, ці системи не придатні для електромобілів. Два типи колій, розроблені для систем динамічної бездротової зарядки (DWC), мають

різну форму, які називаються розтягнутими або кусковими коліями. Розтягнута колія включає котушку передавача, яка значно більша за котушку приймача кускової колії, яка містить багато котушок з радіусами, що можуть досягати майже до котушки приймача. Тільки частина об'єднаної колії зі зв'язаною котушкою передавача може приводити в рух відповідну котушку приймача. Така стратегія живлення, яку іноді називають сегментацією, допомагає підвищити ефективність DWC і зменшити випромінювання електромагнітного поля від незв'язаних сегментів рейок. Переваги бездротової зарядки електромобілів порівнюючи з контактною зарядкою полягають у гальванічній ізоляції та зручності для користувача.

Щоб уникнути використання дротів та шнурів і уникнути потреби у ретельному контролі заряджання і розряджання, можна доволі часто поповнювати заряд акумулятора транспортного засобу. При цьому автомобіль може бути припаркований в різних місцях зарядки, в тому числі, на парковці, вдома, на світлофорі, в магазині. Впроваджуючи зарядні смуги на автомагістралях, які дозволяють заряджати під час руху, DWC може покінчити з інфраструктурою швидкої зарядки. Порівняно з провідною зарядкою, бездротова зарядка має нижчу вартість, розмір, складність виробництва, ефективність та щільність потужності [27-29].

**Порівняльний аналіз методів бездротової зарядки електромобілів**

У ході цієї роботи було розглянуто чотири методи бездротової зарядки, зокрема: індуктивний метод передачі енергії (CWPT), бездротовий метод передачі електроенергії за допомогою магнітів, індуктивний метод передачі енергії (IPT), резонансна індуктивна бездротова система зарядки (RIWC).

RIWC відрізняється високою ефективністю передачі енергії на великі відстані, що робить його привабливим для використання у великих автопарках або громадському транспорті. Однак, необхідність точного налаштування системи та специфічні вимоги до узгодження частот

можуть бути викликом при впровадженні цього методу.

CWPT, з іншого боку, відзначається відсутністю магнітного поля, що робить його більш безпечним для навколишнього середовища. Він також може працювати на відносно великі відстані, але його ефективність може зменшуватися при поганих погодних умовах або внаслідок перешкод.

IPT, як стандартний метод бездротової зарядки, має високий рівень ефективності при перенесенні енергії на короткі відстані. Однак його ефективність зменшується зі збільшенням відстані між зарядною платою та автомобілем. В таблиці 1 наведені результати аналізу основних методів безпроводної зарядки.

Таблиця 1 – Огляд основних методів бездротового заряджання

Особливості	IPT	CWPT	RIWC
Технологія	Використовує магнітні поля для передачі енергії між котушками	Використовує електричні поля для передачі енергії між електродами	Використовує комбінацію магнітного та електричного полів для передачі енергії на великі відстані
Ефективність	85-95%	70-80%	90-95%
Відстань	Невелика дальність дії (до 20 см)	Мала та середня дальність (до 1 метра)	Середня та велика дальність (до декількох метрів)
Вартість	Нижча вартість завдяки простішій технології	Вища вартість через складні конструкції електродів	Помірна вартість
Безпека	Низький ризик електромагнітних перешкод	Можливість утворення дуги та іскріння	Низький ризик перешкод, висока безпека завдяки резонансній частоті
Діапазон частоти передачі	від 19 кГц до 50 кГц	від 100 кГц до 600 кГц.	від 10 кГц до 150 кГц

Виходячи з аналізу, найкращою системою бездротової зарядки електромобілів є резонансна індукційна зарядка. Вона поєднує в собі високу ефективність передачі енергії, безпеку електромагнітного поля та відносну простоту реалізації. Резонансна індукційна зарядка використовує резонанс для підвищення ефективності передачі енергії. При цьому резонансні частоти зарядної станції та електромобіля збігаються, що дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії передачі енергії до 95%. Крім того, резонансна індукційна зарядка безпечна для здоров'я людини. Електромагнітне поле, яке використовується для передачі енергії, має низьку частоту, що робить його нешкідливим. RIWC відносно проста в реалізації. Вона не вимагає використання височастотних компонентів, що знижує її вартість.

Звичайно, резонансна індукційна зарядка має і деякі недоліки. Наприклад, вона більш складна в реалізації, ніж традиційна індукційна зарядка. Однак ці недоліки не є критичними та не перешкоджають її широкому поширенню. У майбутньому, резонансна індукційна зарядка може стати основним методом бездротової зарядки електромобілів. Вона поєднує в собі всі необхідні характеристики для забезпечення ефективної та безпечної зарядки електромобілів.

**Висновки**

У статті було детально проаналізовано різноманітні технології бездротової зарядки для електромобілів, розглянуто їх переваги, особливості та недоліки. Виявлено, що існують різні методи передачі енергії, такі як ємнісний,



магнітний, індуктивний, резонансна індуктивна система зарядки, а також статична та динамічна бездротова зарядка.

Висвітлено перспективи їхнього застосування та потенційні виклики, такі як ефективність передачі, вартість впровадження та вплив на навколишнє середовище. Незважаючи на значний прогрес у цій галузі, виявлено також деякі недоліки, серед яких можна виділити ефективність зарядки, втрату енергії та нестабільність систем.

На даному етапі розвитку електромобілів бездротова зарядка стає значущим напрямком у вдосконаленні та розвитку транспортної інфраструктури. Вона пропонує низку переваг, таких як зручність для користувачів, відсутність необхідності у фізичному підключенні для заряджання, що сприяє зростанню комфорту в користуванні електромобілями.

Серед потенційних викликів бездротової зарядки для електромобілів - вартість впровадження цієї технології. Хоча ціни на обладнання для бездротової зарядки поступово знижуються, вони все ще можуть бути значними для встановлення інфраструктури на великих масштабах.

Ефективність передачі енергії також залишається питанням удосконалення. Оптимізація систем для зменшення втрат енергії під час зарядки та підвищення швидкості заряджання є ключовими напрямками подальших досліджень.

Незважаючи на виявлені недоліки, бездротова зарядка має потенціал стати основним методом заряджання електромобілів у майбутньому. Щоб це сталося, необхідно продовжувати дослідження та розвиток технологій, зокрема, зосередитися на підвищенні ефективності, зниженні вартості впровадження та мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Бездротова зарядка може вирішити багато проблем, пов'язаних зі звичайними методами заряджання електромобілів, і стати ключовим етапом у створенні більш ефективних та екологічно чистих рішень для майбутнього транспорту. Вона відкриває шлях до збільшення зручності та розвитку більш доступної інфраструктури заряджання.

### Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

### Література

1. Dai, J., Ludois, D.C. (2015). A Survey of Wireless Power Transfer and a Critical Comparison of Inductive and Capacitive Coupling for Small Gap Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30, 6017–6029.
2. Qiu, C., Chau, K.T., Liu, C., & Chan, C.C. (2013). Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging. *Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, 7, 1–9.
3. *Electric Vehicle Outlook 2023*. (2023). Retrieved from <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>
4. A Review of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Prospects to Enhance Sustainable Mobility. (2016). Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.003>
5. Electrified mobility overview and challenges. (2016). Retrieved from <https://www.ifpenergiesnouvelles.com/innovation-and-industry/our-expertise/sustainable-mobility/electrified-mobility>
6. Challenges and Barriers of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. (2023). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en16052138>
7. Review on Contactless Power Transfer for Electric Vehicle Charging. (2017). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en10050636>
8. Mi, C.C., Buja, G., Choi, S.Y., & Rim, C.T. (2016). Modern Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 6533–6545.
9. Transportation systems management considering dynamic wireless charging electric vehicles: Review and prospects. (2022). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554522001521>
10. A Survey on User Acceptance of Wireless Electric Vehicle Charging Technology. (2018). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/wevj9030036>
11. Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation. (2023). *Applied Sciences*, 13(10), Article 6016. <https://doi.org/10.3390/app13106016>
12. Coil Design for High Misalignment Tolerant Inductive Power Transfer System for EV Charging. (2016). Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/11/937>
13. Comparison of circular and rectangular coil transformer parameters for wireless Power Transfer based on Finite Element Analysis. (2023). Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/297728994\\_Comparison\\_of\\_circular\\_and\\_rectangular\\_coil\\_transformer\\_parameters\\_for\\_wireless\\_Power\\_Transfer\\_based\\_on\\_Finite\\_Element\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/297728994_Comparison_of_circular_and_rectangular_coil_transformer_parameters_for_wireless_Power_Transfer_based_on_Finite_Element_Analysis)

14. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. (2018). Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>
15. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (2020, September). Development of a unified energy-efficient system for urban transport. In 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon) (pp. 248-253). IEEE.
16. High frequency two-plate capacitive wireless power transfer system. (2018). Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/325417925\\_High\\_frequency\\_two-plate\\_capacitive\\_wireless\\_power\\_transfer\\_system](https://www.researchgate.net/publication/325417925_High_frequency_two-plate_capacitive_wireless_power_transfer_system)
17. Li, S., Liu, Z., Zhao, H., Zhu, L., Shuai, C., & Chen, Z. (2016). Wireless Power Transfer by Electric Field Resonance and its Application in Dynamic Charging. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 6602–6612.
18. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., & Saraiev, O. (2022, May). Features of converting a car with an internal combustion engine into an electric car. In 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON) (pp. 1-6). IEEE.
19. Wireless Energy Transfer by Resonant Inductive Coupling. (2015). DOI:10.13140/RG.2.2.34549.52969
20. Inductive Power Transfer. (2018). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/inductive-power-transfer>
21. Nagendra, G.R., Covic, G.A., & Boys, J.T. (2014). Determining the physical size of inductive couplers for IPT EV systems. In Conference Proceedings-IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC. Fort Worth, TX, USA.
22. Jeong, S., Jang, Y.J., & Kum, D. (2015). Economic Analysis of the Dynamic Charging Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30, 6368–6377.
23. A Review of Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicle Battery Charging with a Focus on Inductive Coupling Vehicles. (2022). Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/9/1355>
24. Hnatov, A., & Arhun, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14(4), 4649-4664.
25. Gnatov, A., Argun, S., & Rudenko, N. (2017, May). Smart road as a complex system of electric power generation. In 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (pp. 457-461). IEEE.
26. Gnatov, A., Argun, S., & Ulyanets, O. (2017, May). Joint innovative double degree master program «Energy-saving technologies in transport». In 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (pp. 1203-1207). IEEE.
27. Different types of wireless electric vehicle charging methods. (2023). Retrieved from <https://ijari.org/assets/conf/NCEVI-2022/NCEVI-09.pdf>
28. Гнатів А. В., Аргун Ш. В., Гнатова Г. А., Сохін П. А. (2022). Переобладнання автомобіля з ДВЗ в електромобіль. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, 21, 22-30. Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Hnatova H. A., Sokhin P. A. (2022). Pereobladnannia avtomobilia z DVZ v elektromobil. [Conversion of a car from an ICE into an electric car]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, 21, 22-30. [in Ukrainian].
29. Гнатів, А. В., & Аргун, Ш. В. (2017). Аналіз схем сонячних електростанцій на фотоелектричних модулях для зарядних станцій електромобілів. *Автомобільний транспорт*, (41), 163-169. Hnatov, A. V., & Arhun, Shch. V. (2017). Analiz skhem soniachnykh elektrostantsii na fotoelektrychnykh moduliakh dlia zariadnykh stantsii elektromobiliv. [Analysis of solar power station schemes on photoelectric modules for electric cars charging stations]. *Avtomobilnyi transport*, (41), 163-169. [in Ukrainian].

**Буряківський Віталій<sup>1</sup>**, студент, Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, тел. + 38 095-039-17-63, [buryakovskiyvitaliy@gmail.com](mailto:buryakovskiyvitaliy@gmail.com),  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4880-6335>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

#### **Analytical review of wireless charging technologies for electric vehicles**

**Abstract. Problem.** *The article provides a comprehensive analysis of the various wireless charging technologies tailored for electric vehicles (EVs). It delves into an in-depth exploration of existing methodologies, challenges, and prospective advancements in this burgeoning field. Goal.* *The purpose of this work is to conduct a comprehensive analysis and critical assessment of diverse wireless charging technologies tailored for electric vehicles (EVs). The primary aim is to systematically evaluate and elucidate the existing methodologies, highlighting their advantages, drawbacks, and key challenges prevalent in this domain. Methodology.* *The research methodology involves an extensive literature review to gather information on wireless charging technologies for electric vehicles. It includes data collection from reputable sources, comparative analysis of technologies based on efficiency and limitations, identification of trends and challenges, interpretation of findings, and conclusions with recommendations. Ethical considerations and acknowledgment of*

limitations are integral parts of the methodology. **Originality.** Research will focus on analyzing wireless charging technologies for electric vehicles, emphasizing original insights derived from comprehensive literature review, comparative analysis, and identification of emerging trends and challenges, ensuring unique contributions to the field. Ethical practices and acknowledgment of limitations will be integral aspects of the research. **Conclusions.** The study presents detailed results of a comparative analysis that highlights the effectiveness, limitations, and emerging trends in wireless charging technologies for electric vehicles. It presents the findings of a comprehensive review that provides insight into the current state and future prospects of these technologies. **Practical value.** Research aims to provide practical

value by offering insights into the effectiveness, limitations, and future potential of wireless charging technologies for electric vehicles, contributing actionable recommendations for industry stakeholders and policymakers.

**Keywords:** electricity, electric car, wireless charging, inductive charging, magnetic resonance charging, energy transfer, induction.

**Vitalii Buriakivskiy**<sup>1</sup>, Student, Kharkiv National Automobile and Highway University, tel. +38 095-039-17-63, buryakovskiyvitaliy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4880-6335>

<sup>1</sup>Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.