

Зимовченко В.О.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОЇ ЗАРЯДКИ. ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ, ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА МАЙБУТНЄ

Сучасний світ важко уявити без технологій, які полегшують наше повсякденне життя. Смартфони, смартгодинники та бездротові навушники, електромобілі та складні медичні пристрої – усі ці винаходи формують наш побут, та вимагають нових підходів до їх заряджання. Бездротова зарядка, є однією з таких інновацій. Завдяки цьому винаходу, ми можемо полегшити наше життя відмовившись від численних кабелів зарядки різного типу, зламані роз'єми та залежність від постійного підключення до мережі за допомогою кабелю, більше не будуть турбувати.

Технології передачі бездротової енергії, ґрунтуються на принципах електромагнітної індукції, резонансної індукції або навіть передачі енергії через радіохвилі, активно почали впроваджуватися у повсякденне життя лише в останні десятиліття. Але ідея цієї технології зародилася значно раніше. Ще в XIX столітті Майкл Фарадей відкрив явище електромагнітної індукції, а Нікола Тесла мріяв про передачу енергії через повітря, використовуючи високочастотні поля. На сьогодні, ці наукові ідеї перетворилися у зручні пристрої, що заряджають смартфони, автомобілі й навіть медичне обладнання без потреби підключенню по кабелю.

Використання бездротової зарядки для смартфона не є чимось унікальним. Чудовим прикладом інновації і задумок інженерів є впровадження бездротової зарядки у транспорті, де зарядка електромобілів або іншої колісної електротехніки більше не потребує обов'язкового підключення за допомогою кабелю. На ринку все більше з'являється альтернатив з вже вбудованою технологією бездротової зарядки, насамперед це дрони, автономні роботи, та побутова техніка що потребує мобільності. Водночас у побуті з'являються меблі, з вже інтегрованими зарядними станціями, що додає більше комфорту та зручності до нашого життя.

Технології бездротової зарядки – це не лише технологічний прорив, а й символ змін, що відбуваються у нашому світі. Вони нагадують, що майбутнє може бути простішим та зручнішим. Але інженерам ще потрібно буде попрацювати над питанням ефективності та втратою енергії при заряджанні. Проблеми перегріву та тривалого часу зарядки також вимагають вирішення.

В статті аналізуються ключові аспекти бездротової зарядки: принципи її роботи, сучасні стандарти, переваги та недоліки, а також можливості її застосування у різних сферах життя. Детально проаналізовано технології, які вже змінюють наше життя, спробуємо поглянути у майбутнє, де бездротова енергія стане невід'ємною частиною життя та побуту людини.

Ключові слова: бездротова зарядка, радіочастотна передача, резонансна індукція, електроніка, електротранспорт, Qi, зарядна станція, пристрій.

Постановка проблеми. Бездротові зарядки стають все більш популярними завдяки зручності використання та їхньому впливу на дизайн пристроїв. Проте, незважаючи на значний прогрес у цій сфері, технологія має ряд викликів, які обмежують її впровадження.

Перш за все, це проблема низької ефективності. У бездротових зарядках частина енергії втрачається у вигляді тепла, що призводить до меншої продуктивності порівняно з традиційними дротовими зарядками. Це особливо критично для пристроїв із великими енергетичними потребами, такими як електромобілі, де втрати енергії можуть бути значними.

Другий аспект – це тривалий час зарядки. Бездротові зарядки часто працюють повільніше, ніж їхні дротові аналоги, що зменшує їхню привабливість для користувачів, для яких швидкість і доступність на першому місці.

По третє, це обмеження у відстані та просторі передачі енергії. Поточні технології вимагають точного позиціонування пристрою на зарядній станції або перебування в зоні дії магнітного поля. Це створює незручності, які суперечать самій ідеї гнучкого використання бездротової енергії.

Також виникають питання щодо перегріву, особливо під час використання пристроїв із високою потужністю зарядки. Це може не лише впливати на

тривалість роботи акумуляторів, але й викликати занепокоєння щодо безпеки технології.

Окрім технічних аспектів, важливим викликом є стандартизація. Різні виробники використовують власні методи зарядки, що створює проблеми сумісності між пристроями. Наприклад, гаджети з підтримкою стандарту Qi не завжди працюють із зарядними станціями інших стандартів.

Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, щоб бездротові зарядки могли не лише конкурувати з дротовими, але й перевершувати їх за всіма параметрами. Розвиток цієї технології залежить від подальших досліджень, удосконалення матеріалів, підвищення ефективності передачі енергії та створення універсальних стандартів, які забезпечать широку доступність і взаємодію пристроїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження у сфері бездротового заряджання висвітлює низку перспективних напрямків і викликів. Зокрема, науковці активно досліджують ефективність передачі енергії на різних дистанціях, розвиток інфраструктури для електромобілів та вдосконалення динамічного заряджання.

Ефективність передачі енергії. Дослідження що проводилися в університеті Аалто (*Aalto University*), що у Фінляндії, досягли ефективності понад 80% при передачі енергії на відстані до 18 см. Це значне досягнення для подолання проблем втрат енергії, які традиційно зростають зі збільшенням дистанції при передачі. Такий прорив може покращити автономність пристроїв та електромобілів, роблячи їх більш практичними [1].

Динамічне заряджання транспортних засобів. У Технологічному університеті Делфта (*Delft University of Technology*) активно досліджується концепція заряджання електромобілів під час руху. Основна увага приділяється оптимізації процесу заряджання, розпізнаванню сторонніх предметів у зоні заряджання та зменшенню втрат енергії. Цей напрямок дозволить створювати інтелектуальні дороги, де електромобілі зможуть заряджатися без зупинок [2].

Системи й технології [3]. У наукових публікаціях активно розглядаються різні методи передачі енергії, такі як індуктивне, магнітно-резонансне та навіть мікрохвильове заряджання. Сучасні дослідження акцентують увагу на створенні універсальних стандартів та сумісних рішень для інтеграції технологій у різні галузі, включаючи побутову електроніку та транспорт.

Стандартизація та безпека. У роботах IEEE вказується на необхідність уніфікації зарядних

платформ для різних типів пристроїв, що стимулюватиме ринок та зробить ці рішення більш доступними [3, 4]. Подальші розробки мають потенціал стати рушійною силою розвитку електромобілів, портативних пристроїв і навіть розумних міст.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз сучасного стану бездротових технологій, поглиблене дослідження переваг та викликів, її вплив на різні галузі та майбутнє. Показати, як бездротові технології трансформують індустрію, від мобільних пристроїв до електротранспорту, а також які нові стандарти і технологічні розробки обіцяють зробити цю технологію більш доступною та ефективною.

Виклад основного матеріалу. Принцип роботи електромагнітної індукції полягає у створенні електричного струму в провіднику завдяки зміні магнітного потоку, що проходить через нього. Вперше це явище було відкрито Майклом Фарадеєм у 1831 році і є основою роботи багатьох електротехнічних пристроїв, таких як трансформатори, генератори та індукційні двигуни.

В сучасних бездротових зарядних пристроях які ми використовуємо в повсякденному житті принцип роботи базується на передачі енергії між двома котушками через змінне магнітне поле. Працює це наступним чином:

1. Через *катушку що передає* (у зарядному пристрої) проходить змінний електричний струм, що створює змінне магнітне поле навколо цієї ж катушки.

2. У пристрої що заряджається (наприклад, смартфоні), є *приймальна катушка*. Як тільки вона опиняється в зоні дії змінного магнітного поля, у катушці індукується змінний струм.

3. Індукований змінний струм у *приймальній катушці* перетворюється в постійний за допомогою випрямляча. Після чого, цей струм використовується для зарядки батареї пристрою.

Можна виділити кілька особливостей в роботі такої зарядної станції:

Ефективність. Відстань між катушками впливає на ефективність передачі енергії. Зазвичай це кілька міліметрів.

Резонансна індукція. Для підвищення ефективності обидві катушки налаштовуються на одну і ту ж саму резонансну частоту.

Безконтактність. Фізичний контакт між пристроєм і зарядкою не є обов'язковим.

З прикладів де саме застосовується, можна виділити бездротові зарядні станції для телефонів (*Qi-стандарт*), медичні імпланти з індуктивною зарядкою, та зарядні станції для електромобілів.

Принцип роботи резонансної індукції в зарядних пристроях заснований на передачі енергії між двома котушками, налаштованими на одну і ту ж резонансну частоту. Це дозволяє ефективно передавати енергію навіть на більших відстанях у порівнянні з традиційною електромагнітною індукцією.

Це працює наступним чином:

1. Змінний генератор, що підключений до *передавальної котушки* створює змінний струм на резонансній частоті котушки. Це генерує змінне магнітне поле.

2. *Приймальна котушка налаштована* на ту ж саму резонансну частоту, що і передавальна. Коли котушка опиняється в зоні дії магнітного поля, у ній виникає індукований струм.

3. Резонансна індукція забезпечує підсилення енергії, яка передається від *передавальної до приймальної котушки*. Це досягається завдяки тому, що резонансні контури мінімізують втрати енергії.

4. Індукований змінний струм у приймальній котушці перетворюється в постійний за допомогою *випрямляча*, і цей струм заряджає акумулятор пристрою.

Особливостями даного принципу є:

Більша відстань передачі енергії. Резонансна індукція працює на більших відстанях порівняно зі звичайною індукцією (кілька десятків сантиметрів).

Більша ефективність. Налаштування обох котушок на одну і ту ж саму частоту зменшує втрати енергії.

Резонансна індукція демонструє перспективи розвитку бездротової передачі енергії, роблячи її зручнішою та ефективнішою, тому знайшла своє місце в бездротових зарядних станціях для електротранспорту, медицині та портативній електроніці.

Принцип роботи радіочастотної передачі енергії (РЧПЕ) в зарядних пристроях побудований на використанні електромагнітних хвиль у радіочастотному діапазоні для бездротової передачі енергії від передавача до приймача. Це дозволяє заряджати пристрої на значній відстані порівняно з індуктивною або резонансною зарядкою. Не дивлячись на те, що найбільш відомими технологіями бездротової зарядки є системи на основі індукції, технологія радіочастотної передачі енергії має кілька унікальних переваг та можливостей

Принцип роботи радіочастотної передачі:

1. Передавач генерує радіочастотні хвилі в певному діапазоні (915 МГц або 2.4 ГГц), які потім спрямовуються на приймач в пристрої.

2. Вбудований приймач у пристрої, захоплює ці хвилі за допомогою антен, після чого радіохвилі за допомогою випрямляча перетворюються назад в електричну енергію, яка заряджає акумулятор пристрою.

Особливості та переваги:

Зарядка на відстані. РЧПЕ дозволяє заряджати пристрої на відстані від кількох сантиметрів до кількох метрів. Це робить зарядні пристрої більш універсальними.

Мультифункціональність. Можливість заряджати не один, а декілька пристроїв одночасно в зоні дії передавача.

Гнучкість в розташуванні. Як приймач так і передавач не потребують точного розташування в просторі.

Радіочастотна передача є перспективною технологією, яка розширює можливості бездротової зарядки та робить її більш універсальною, але в той же час вона має і недоліки:

Низька ефективність на великих відстанях через розсіювання радіохвиль.

Обмеження потужності звужує коло пристроїв які мають низьке енергоспоживання.

Використання радіохвиль потребує дотримання норм щодо впливу електромагнітного випромінювання на здоров'я людини. Не зважаючи на перспективність даної технології, на сьогодні *масового* її використання для зарядки пристроїв не виявлено.

Лазерна та інфрачервона передача енергії, використовуються для бездротового заряджання електронних пристроїв, і обидві технології ґрунтуються на використанні електромагнітного випромінювання

Система лазерної зарядки, розроблена в Університеті Седжонг, Південна Корея, використовує інфрачервоний лазер для передачі енергії на відстань до 30 метрів. Вона складається з передавача та приймача, які створюють резонатор у вільному просторі, що дозволяє ефективно передавати енергію малим пристроям, таким як датчики або *IoT-гаджети*. Система автоматично блокує лазерний промінь у разі перешкоди, тим самим забезпечуючи безпеку.

Технологія лазерної передачі енергії передбачає використання когерентного лазерного випромінювання для передачі енергії на відстань. Її принцип роботи виглядає наступним чином:

1. *Джерело енергії.* Електрична енергія конвертується в лазерний промінь із певною довжиною хвилі (зазвичай у видимому або ближньому інфрачервоному спектрі).

2. *Передача енергії.* Лазерний промінь спрямовується на приймач, який розташований на зарядному пристрої або пристрої, що заряджається.

3. *Приймач енергії.* На пристрої, що заряджається, встановлюється фотодіод або інша фотоелектрична матриця, яка перетворює лазерне світло назад в електричну енергію.

4. *Зарядження.* Конвертована енергія використовується для зарядження акумулятора пристрою.

Особливостями даного методу є висока ефективність на коротких відстанях. Але при цьому, повинна зберігатись пряма видимість між передавачем і приймачем, оскільки лазерний промінь не може огинати перешкоди. Питання безпеки вимагає заходів для уникнення потенційної шкоди, яку може спричинити лазерний промінь для очей або шкіри.

Технологія інфрачервоної передачі енергії ґрунтується на використанні інфрачервоного (ІЧ) випромінювання з довжиною хвилі 700–1000 нм, що належить до невидимого спектра, для бездротового перенесення енергії. Її принцип роботи виглядає наступним чином:

1. *Джерело енергії:* ІЧ-світлодіоди випромінюють ІЧ-хвилі.

2. *Передача енергії:* Інфрачервоне випромінювання спрямовується до приймача, розташованого на пристрої.

3. *Приймач енергії:* Фотоелектричний приймач (подібний до сонячної панелі) перетворює інфрачервоні хвилі на електричну енергію.

4. *Зарядження:* Електроенергія, отримана в результаті конвертації, використовується для зарядження акумуляторів пристрою.

Особливостями даного методу є менша потужність, ніж у лазерної. Також не потрібно прямої видимості, оскільки ІЧ-хвилі можуть частково проникати через деякі матеріали. Технологія безпечніша за лазерну, оскільки ІЧ-випромінювання має нижчу інтенсивність.

Обидві технології мають свої переваги й обмеження, і вибір залежить від конкретного застосування. Лазерна передача підходить для високотужних задач із прямою видимістю, тоді як інфрачервона – для низькопотужних і безпечніших рішень.

Технології Qi, AirFuel Alliance, Proprietary Standards та Tesla Wireless Charging Platform.

Технологія Qi є глобальним стандартом бездротової зарядки, розробленим *Wireless Power Consortium* [5]. Ця технологія використовує електромагнітну індукцію для передачі енергії між зарядною станцією і пристроєм. Вона функціонує на частоті від 100 до 205 кГц, і забезпечує потуж-

ність від 5 до 15 Вт, хоча нова версія *Qi2* підтримує швидші режими зарядки до 15 Вт і сумісність з магнітними аксесуарами, як *MagSafe* від *Apple*. *Qi* є одним із найпоширеніших стандартів, який підтримують понад 3700 сертифікованих пристроїв, включаючи смартфони, навушники та інші гаджети. Технологія також забезпечує адаптивну зарядку, покращене управління теплом і захист від сторонніх об'єктів, що підвищує її безпеку та ефективність.

Технологія AirFuel Alliance пропонує два основні стандарти: *AirFuel Inductive* (раніше відома як *PMA*) та *AirFuel Resonant* [6, 7]:

AirFuel Inductive використовує індуктивну зарядку на частоті від 277 до 357 кГц, забезпечуючи її використання на невеликих відстанях з підтримкою декількох пристроїв одночасно.

AirFuel Resonant базується на магнітному резонансі, дозволяючи заряджати пристрої з більшою свободою позиціонування і на більшій відстані (до 50 мм). Ця технологія підходить для гаджетів різної потужності (від смартфонів до роботів), забезпечує швидкість зарядки, аналогічну провідній, та є ефективною для комерційних і домашніх застосувань.

Proprietary Standards. Виробники на кшталт *Apple*, *Samsung* або *Xiaomi* розробляють власні стандарти бездротової зарядки, оптимізовані для їхніх екосистем [8]. Для прикладу, *MagSafe* від *Apple* базується на *Qi* з додатковою магнітною підтримкою для точного позиціонування пристроїв на зарядній станції. Максимальна потужність зарядки від *Apple* – 15 Вт. Вона не є універсальною, і підходить тільки для iPhone.

Xiaomi активно досліджує інноваційні технології у сфері бездротової зарядки. Основним проривом може стати їх технологія *Mi Air Charge*, яка забезпечує дистанційну зарядку пристроїв на відстані. Ключовими аспектами цієї технології є система зарядної станції з 144 антенами, які створюють вузькоспрямовані міліметрові хвилі, передаючи енергію на пристрій. В свою чергу пристрій оснащений випрямлячем з антеною приймає її, та конвертує цю енергію в електричний струм.

Технологія дасть змогу заряджати пристрої на відстані декілька метрів з потужністю 5 Вт, без зниження ефективності, навіть якщо між пристроєм і зарядною станцією є перешкоди. Вона дасть змогу заряджати смартфони, смартгодинники, фітнес браслети, розумні колонки та інші *IoT-пристрої*.

Офіційної дати виходу зарядної станції компанії ще не оголосила.

Tesla Wireless Charging Platform – це інноваційний бездротовий зарядний пристрій, що використовує передові технології для зручного й ефективного заряджання декількох пристроїв одночасно [9]. Його дизайн та функціональність вирізняють його серед аналогів на ринку бездротових зарядних пристроїв. Технологія *FreePower* використовує 30 зарядних котушок, що дозволяє уникнути необхідності позиціонування пристрою на зарядній станції, підтримує одночасну зарядку до трьох пристроїв з потужністю 15 Вт, забезпечуючи при цьому динамічний розподіл енергії для кожного пристрою окремо. Виробником заявлено зменшення втрат енергії під час передачі енергії, що робить пристрій екологічним і менш схильним до перегрівання.

До переваг можна віднести відсутність точного позиціонування на зарядній станції, систему захисту виявлення сторонніх металевих об'єктів з автоматичним вимкненням зарядки для запобігання перегріванню, а також сумісність зі всіма пристроями, що підтримують стандарт *Qi*. Можна заряджати всю портативну електроніку.

Зарядну станцію можна використовувати як в горизонтальному, так і в вертикальному положенні.

Бездротова зарядка для електротранспорту.

Компанія Ілона Маска *Tesla* активно розвиває технологію бездротової зарядки для своїх електромобілів. Одна з останніх інновацій – система індуктивної зарядки, яка вже була анонсована для моделей, таких як *Tesla Cybercab*, що планується до запуску у 2026–2027 роках [10, 11]. Особливість *Cybercab* полягає в тому, що він не матиме порту зарядки та буде підтримувати лише бездротове заряджання. Компанія обіцяє ефективну зарядку понад 90% при швидкості до 25 кВт, що перевищує домашні зарядні станції, але поступається потужності *Tesla Supercharger* (до 250–350 кВт).

Tesla також придбала німецьку компанію *Wiferion*, яка спеціалізується на технологіях бездротової індуктивної зарядки для промислового використання, особливо для автономних транспортних систем (*AGV*), мобільних роботів (*AMR*) та інших логістичних рішень [12]. Їх система *etaLINK* забезпечує безконтактну передачу енергії з ефективністю до 93%, що значно покращує продуктивність і знижує час простою.

Автомобільна дорога, з динамічною зарядкою, яка дозволяє заряджати електромобілі під час руху. Це реалізується через індукційні котушки, інтегровані в дорожнє покриття. Такі проекти тестуються в Ізраїлі та Швеції. Це дозволить ско-

ротити кількість зарядних станцій, та сприятиме розвитку електромобільної промисловості.

WiTricity – провідна компанія в розробці бездротових зарядних технологій для електромобілів [13]. Заснована у 2007 році, компанія використовує магнітний резонанс для передачі енергії. Її флагманська система *WiTricity Halo* забезпечує зарядку з ефективністю до 90% навіть при певному зсуві між автомобілем і зарядною платформою. Технологія відповідає стандартам *SAE J2954* і підтримується багатьма автовиробниками. Компанія співпрацює з виробниками легкових автомобілів, комерційних транспортних засобів та індустриального обладнання. Вона також розробляє рішення для автобусів та іншої техніки, як у випадку з китайськими автономними електро міні бусами. *WiTricity* прагне зробити зарядку зручною, інтегруючи свої рішення в розумні міста.

Сфери застосування.

Бездротові зарядні станції активно впроваджуються у різних сферах завдяки своїм перевагам, таким як зручність, безпека та зменшення зношування роз'ємів. Розглянемо їх застосування в таких галузях як споживча електроніка, електротранспорт, медицина, промисловість та які вона має перспективи розвитку.

Бездротові зарядні станції в споживчій електроніці забезпечують зручність для кінцевого користувача. Технологія *Qi* стала стандартом для заряджання таких портативних пристроїв як смартфони, смартгодинники чи планшети. Комп'ютерна периферія також отримує можливість заряджати мишки і клавіатури не використовуючи кабелі. Компанія *IKEA* інтегрує зарядні станції в кухонні поверхні та лампи. Павербанки тепер підтримують бездротову передачу енергії, що забезпечує зручність як у щоденному використанні, так і під час подорожей. Зручність і доступність стають головною перевагою на користь бездротового з'єднання.

У сфері електротранспорту бездротові зарядки стають важливим компонентом майбутньої інфраструктури. Технології бездротового заряджання впроваджуються у громадські та приватні зарядні станції для автомобілів. Системи з індуктивною зарядкою, дозволяють заряджати авто, просто припаркувавши його поряд с такою станцією. Електробуси та тролейбуси обладнуються станціями для індуктивного заряджання на зупинках. Електросамокати, велосипеди та скутери можуть заряджатися за допомогою портативних бездротових станцій, як в домашніх умовах, так і на вулицях міста. Перевагами такої зарядки є безпека, змен-

шення необхідності ручного підключення кабелів, інтеграція в інфраструктуру міста.

У медицині бездротові зарядки вирішують проблему стерильності, безпеки, надійності та зменшенню хірургічного втручання. Кардіостимулятори чи слухові апарати, заряджаються через шкіру пацієнта, зменшуючи ризик потрапляння інфекцій. У промисловості бездротові зарядні станції підвищують ефективність роботи та знижують витрати на технічне обслуговування. Зарядка автономних роботів на виробництвах або складах, таких як *AGV (Automated Guided Vehicles)*, дозволяє мінімізувати зупинки у роботі. Інтеграція зарядних платформ у робочі поверхні для бездротового заряджання будівельного обладнання. Зарядка датчиків, камер, контролерів та інших пристроїв *IoT*. Перевагами використання бездротового заряджання в промисловості є стійкість до зношування, безпека у вибухонебезпечних середовищах, можливість автоматизації зарядного процесу.

Перспективами розвитку в перелічених вище галузях можна вважати збільшення ефективності та дальності бездротової передачі енергії, інтеграція з технологіями *Smart Grid* та *IoT*. Використання резонансної та магнітної індукції для великих потужностей. Розширення стандартизації для різних сфер застосування.

Переваги та недоліки використання бездротової зарядки.

Перевагами використання бездротової зарядки є зручність і універсальність у використанні. Завдяки стандарту *Qi*, портативні пристрої можна заряджати як разом, так і окремо на одній зарядній станції, а інтеграція в меблі, автомобілі та публічні місця, такі як кафе або заклади медицини зробить технологію ще більш привабливою.

Відсутність постійного підключення кабелів продовжує термін служби портів пристрою, та знижує ризики поломки кабелів та контактів. У майбутньому повна відмова від роз'ємів і кабелів на користь бездротових технологій дозволить зробити портативну електроніку ще більш захищеною від вологи та пилу.

Серед недоліків використання бездротової зарядки є втрата частини енергії під час самого процесу зарядки, що призводить до збільшення загального енергоспоживання для заряджання пристрою. Обмеження потужності, вона нижча ніж у сучасних швидкісних кабельних зарядках. Потреба у точному позиціонуванні для початку зарядки, та неможливість використання під час самої зарядки (електромагнітна або резонансна

індукція). Під час заряджання може спостерігатися нагрівання пристрою, що впливає на довговічність акумулятора. Необхідність дотримання суворих стандартів безпеки для уникнення перегрівання. Бездротові зарядки, інтегровані у меблі, не можна перенести в інше місце чи кімнату, а самі станції зазвичай дорожчі, ніж традиційні кабельні зарядки.

Перспективи розвитку.

Технології бездротової передачі енергії, такі як *Wi-Charge* та *Ossia (Cota)*, створюють революційний підхід до забезпечення пристроїв електроенергією. Ці технології працюють на основі передачі енергії через повітря, що дозволяє їх заряджати без прямого контакту або необхідності точного вирівнювання, як у традиційних бездротових зарядках.

Wi-Charge використовує інфрачервоні лазерні промені для передачі енергії на значні відстані, можна говорити про кілька метрів. Зарядні пристрої можуть бути інтегровані в світильники, меблі або стелі, забезпечуючи автоматичне заряджання пристроїв у зоні покриття. Це відкриває перспективи використання у «розумних будинках» та офісах.

Wi-Charge є ідеальним рішенням для пристроїв Інтернету речей (*IoT*), які часто розташовуються в важкодоступних місцях і потребують автономного джерела живлення, наприклад, датчики, камери спостереження, тощо. Лазерна технологія побудована з урахуванням вимог до безпеки для людей і домашніх тварин.

До перспектив розвитку можна віднести збільшення потужності без шкоди навколишньому середовищу, та вирішення питання з необхідністю прямих ліній між передавачем і пристроєм.

Ossia (Cota) використовує радіочастоти (*RF*) для передачі енергії, дозволяючи заряджати пристрої в межах зони дії передавача. Ця технологія має значні перспективи для розвитку завдяки своїй гнучкості. На відміну від *Wi-Charge*, *Cota* здатна передавати енергію навіть через перешкоди, такі як стіни, меблі або інші предмети, завдяки використанню радіохвиль.

Технологія дозволяє заряджати пристрої в радіусі до 10 метрів від передавача, створюючи зарядну зону в приміщенні з можливістю одночасного заряджання кількох пристроїв. Використання *Cota* ідеальна для великих об'єктів, таких як склади, фабрики або торговельні центри, де потрібно заряджати багато бездротових датчиків чи пристроїв. Застосування в розумних містах для живлення вуличних сенсорів, камер, рекламних дисплеїв тощо.

Для розвитку технології потрібно вирішити питання з низькою ефективністю передачі енергії на великі відстані. Обмеження щодо кількості пристроїв, які можуть заряджатися одночасно. Необхідність забезпечення суворим стандартам безпеки, задля збереженню життю і здоров'ю людині при роботі з технологією.

Сфери застосування обох технологій дуже широкі. Від портативної електроніки і *IoT*, до міського освітлення, камер спостереження, датчиків, сенсорів дронів та автоматизованих систем без зарядних станцій.

Технології *Wi-Charge* та *Ossia (Cota)* є перспективними рішеннями, які можуть суттєво змінити підхід до заряджання пристроїв. Їх розвиток сприятиме створенню більш гнучкої, бездротової екосистеми, зменшенню залежності від кабелів і роз'ємів та відкриє нові можливості в побуті, промисловості та інфраструктурі розумних міст. Однак для масового впровадження необхідно подолати виклики, пов'язані з ефективністю, безпекою та стандартизацією.

Висновки. Бездротові технології заряджання активно розвиваються та інтегруються в сучасне життя, забезпечуючи зручність і нові можливості для користувачів. Однак існують виклики, пов'язані з ефективністю, потужністю, безпекою

та стандартизацією, які потребують вирішення. У перспективі ці технології можуть стати стандартом для більшості пристроїв, значно змінюючи те, як ми користуємося електронікою в повсякденному житті.

Популярність бездротових зарядок пояснюється не лише їх зручністю, але й безпекою та універсальністю. Відсутність фізичних з'єднань мінімізує ризики короткого замикання, зношування контактів або потрапляння вологи в пристрій. Особливо важливим це стає у медицині, де герметичність і стерильність є ключовими вимогами до обладнання. Крім того, бездротова зарядка стала важливим елементом дизайну сучасних гаджетів, які тепер можуть бути водонепроникними та пилозахисними.

Однак, незважаючи на очевидні переваги, бездротова зарядка має й свої недоліки. Втрата енергії, менша ефективність у порівнянні з дротовими аналогами, а також необхідність розміщення пристрою у конкретній ділянці на зарядній станції змушують виробників не зупинятись на досягнутому. Нові стандарти, як-от *Qi2*, *AirFuel Alliance*, *Wi-Charge*, *Ossia (Cota)* та інші, вдосконалюють свої технології, забезпечуючи більшу потужність, підтримку більшої кількості сумісних пристроїв та навіть можливість зарядки на відстані.

Список літератури:

1. David Shiller «Researchers Achieve 80+% Efficiency For Long-Distance Wireless Charging»: сайт URL: <https://research.tudelft.nl/en/publications/dynamic-wireless-charging-of-electric-vehicles>
2. Mohammad Rabih, Maen Takruri, Mohammad Al-Hattab, Amal A. Alnuaimi, Mouza R. Bin Thaleth «Wireless Charging for Electric Vehicles: A Survey and Comprehensive Guide» сайт URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/15/3/118>
3. Aqueel Ahmad, Mohammad Saad Alam, Rakan Chabaan «A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles» сайт URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8101562>
4. Simon Hill «What Is Qi2? The Wireless Charging Standard Goes Magnetic» сайт URL: <https://www.wired.com/story/what-is-qi2-wireless-charging/>
5. «About AirFuel Alliance» сайт URL: <https://airfuel.org/faq/>
6. «Magnetic Resonance Charging Standard For Multi-Device Charging» сайт URL: <https://airfuel.org/airfuel-resonant/>
7. Doug Bonderud «How Wireless Charging Technology Works (Qi vs PMA), and How Businesses Can Use It» сайт URL: <https://biztechmagazine.com/article/2021/03/how-wireless-charging-technology-works-and-how-businesses-can-use-it-perfcon>
8. Julian Chokkattu «Review: Tesla Wireless Charging Platform» сайт URL: <https://www.wired.com/review/tesla-wireless-charger/>
9. Fred Lambert «Tesla releases closer look at its upcoming wireless EV charger» сайт URL: <https://electrek.co/2024/10/18/tesla-releases-closer-look-at-its-upcoming-wireless-ev-charger/>
10. Karan Singh «Tesla Shares Details of Its Upcoming Wireless Charger [VIDEO]» сайт URL: <https://www.notateslaapp.com/news/2331/tesla-shares-details-of-its-upcoming-wireless-charger-video>
11. «Industrial wireless charging & power solutions» сайт URL: <https://www.wiferion.com/us/>
12. Firas Navarro «WiTricity: Powering the Future of Electric Mobility with Wireless Charging» сайт URL: <https://evchargingmag.com/witricity-powering-the-future-of-electric-mobility-with-wireless-charging>

Zymovchenko V.O. WIRELESS CHARGING TECHNOLOGIES: EXPLORATION OF INNOVATIVE SOLUTIONS, OPERATING PRINCIPLES, AND FUTURE PROSPECTS

The modern world is hard to imagine without technologies that simplify our daily lives. Smartphones, smartwatches, wireless earbuds, electric vehicles, and advanced medical devices – all these inventions shape our routines and demand new approaches to charging. Wireless charging has emerged as one such innovation. This technology eliminates the need for numerous types of charging cables, worn-out connectors, and constant dependency on wired network connections, making everyday life more convenient.

Wireless energy transfer technologies, based on principles such as electromagnetic induction, resonant induction, or even energy transmission via radio waves, have only begun to be widely implemented in recent decades. However, the concept behind this technology dates back much further. In the 19th century, Michael Faraday discovered electromagnetic induction, and Nikola Tesla envisioned energy transmission through the air using high-frequency fields. Today, these scientific ideas have evolved into convenient devices that charge smartphones, vehicles, and even medical equipment without the need for physical connections.

Wireless charging for smartphones is no longer unique. A striking example of engineering ingenuity is the application of wireless charging in transportation, where electric vehicles and other wheeled technologies no longer require cables for charging. The market is witnessing a growing presence of devices with built-in wireless charging technologies, including drones, autonomous robots, and household appliances requiring mobility. Additionally, furniture with integrated charging stations is becoming increasingly common, adding comfort and convenience to daily life.

Wireless charging technologies represent not only a technological breakthrough but also a symbol of ongoing change in our world. They remind us that the future can be simpler and more convenient. Nevertheless, engineers must address challenges such as energy loss, efficiency, overheating, and long charging times.

This article analyzes the key aspects of wireless charging, including its operating principles, current standards, advantages, disadvantages, and applications across various fields. It provides an in-depth examination of technologies already transforming our lives and offers a glimpse into a future where wireless energy becomes an integral part of human life and everyday routines.

Key words: *wireless charging, radio-frequency energy transfer, resonant induction, electronics, electric transportation, Qi, charging station, device.*