

О.В. ВОРГУЛЬ, канд. техн. наук, І.В. ІГНАТЮК, Т.В. МАЧОНІС, О.Д. ШУНІБОРОВ

БЕЗДРОТОВА ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ (БПЕ): АНАЛІЗ СТАНДАРТІВ, КОМЕРЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВ

Вступ

Дана робота є спробою скласти структурований звіт про бездротову передачу енергії (БПЕ) на основі двох стандартів від МСЕ [2303, 2392] і фактичні комерційні результати. По-перше, авторів цікавить цілепокладання цього напрямку. На нашу думку, використання кабелів робить електроніку безпечнішою. Тоді, з якою ж метою робити БПЕ, коли вона ефективніша та інша? По-друге, ознайомившись зі звітами МСЕ, ми знаємо, що за дальністю роботи БПЕ діляться на групи – контактні (зарядні станції різної потужності) – середня зона – далека зона. Остання має на увазі віддалення на кілометри, можливо, навіть ближній космос. Нас цікавить опис кожної групи, практичні приклади проєктів, основні вимоги та параметри. По-третє, пошуки на цю тематику приводять нас до комерційних рішень, таких, як Qi, Air Fuel Resonant та інші. Наше завдання – збирання та структурування короткої інформації, можливо, історії з динамікою, коротко – параметри та практичне застосування.

1. Цілепокладання БПЕ: Навіщо її використовувати, якщо є кабелі?

Кабелі дійсно забезпечують найвищу ефективність, надійність та безпеку для стаціонарних пристроїв, хоча їх використання не завжди можливе і не завжди зручне. Проте БПЕ вирішує принципово інші завдання:

Зручність та спрощення: усуває необхідність фізичного підключення/відключення (заряджання смартфонів, навушників, зубних щіток, інструментів). Особливо критично для пристроїв із частим використанням/підзарядкою.

Підвищена надійність у специфічних умовах.

Усунення роз'ємів:

- знижує зношування (механічні пошкодження контактів);
- виключає корозію контактів від вологи, пилу, хімікатів (промисловість, вуличні пристрої);
- дозволяє створювати повністю герметичні корпуси (медичні імпланти, підводні датчики).

Мобільність і автономність: заряджання пристроїв у русі (електромобілі на світлофорах/зупинках, AGV/роботи на складах, дрони).

Доступність і безпека: заряджання пристроїв у труднодоступних, небезпечних або стерильних середовищах (біомедичні датчики всередині тіла, пристрої в чистих кімнатах, обладнання у вибухонебезпечних зонах) без порушення цілісності середовища.

Динамічне електроживлення: передача енергії до об'єктів, що постійно рухаються (крани на виробництві, поїзди, конвеєрні системи).

Резервне або альтернативне харчування: бездротова доставка енергії в зони лиха або віддалені локації (супутники, IoT-сенсори в полях/лісах).

Естетика та дизайн: приховані зарядні поверхні в меблях, автомобілях, громадських місцях.

Висновок з цілепокладання: БПЕ не прагне повністю замінити кабелі там, де вони оптимальні. Вона створює нові можливості та вирішує специфічні проблеми, де фізичне з'єднання неможливе, незручне, небезпечне або знижує надійність/мобільність.

2. Класифікація БПЕ за дальністю (на основі підходів МСЕ)

МСЕ (ITU) визначає кілька класів, здебільшого можна розглядати три зони:

2.1. Контактна/ближня зона (Near-Field / Contact-based):

Опис: передача на відстані значно меншій за розміром передавальної/приймної котушки (сантиметри). Засновано на *магнітній індукції* (Qi) або *магнітному резонансі* (ефективніший на трохи більшій відстані/при розбіжності осей).

Фізика: сильний зв'язок котушок. Енергія передається через змінне магнітне поле.

Приклади проєктів чи застосування:

- Qi (WPC): смартфони, навушники, розумний годинник, мишки, клавіатури, медичні інструменти (швидка стерилізація без роз'ємів);
- кухонна техніка: індукційні плити (дуже висока потужність);
- промисловість: заряджання безпілотних AGV (Automatic Guided Vehicles) на станціях;
- електромобілі: стаціонарна зарядка паркування (SAE J2954).

Основні параметри та вимоги:

- дальність: міліметри – сантиметри (до ~5–10 см для резонансних);
- потужність: міллівати (датчики) – кіловати (індукційні плити, швидка зарядка EV);
- ККД: високий (70–95 %), сильно залежить від відстані, поєднання котушок та навантаження;
- безпека: стандарти (Qi, SAE J2954) суворо регламентують рівні ЕМП, контроль температури сторонніх об'єктів (FOD), зв'язок між передавачем та приймачем;

Ключові вимоги: точне позиціонування (особливо для індукції), контроль якості зв'язку, керування потужністю.

2.2. Середня зона (Mid-Field):

Опис: передача на відстані, порівнянному або трохи більшому за розмір антен (десятки сантиметрів – одиниці метрів). Використовує *магнітний резонанс* або *радіочастотні (РЧ) методи* (спрямовані антени).

Фізика: ослаблений зв'язок котушок (резонанс) або спрямоване випромінювання РЧ-хвиль. Вимагає більш складного управління.

Приклади проєктів/застосування:

- побут: заряджання на столі/поверхні без точного позиціонування (AirFuel Resonant);
- медицина: зарядка імплантатів (кардіостимулятори, нейростимулятори) через шкіру;
- робототехніка: зарядка сервісних роботів при заїзді на базу;
- споживча електроніка: "зарядка в кімнаті" (концепти, що розвиваються);
- IoT: живлення/зарядка датчиків у межах кімнати або невеликого приміщення.

Основні параметри/вимоги:

- дальність: ~0,5 – 5 м (умовно);
- потужність: міллівати – сотні ватт (зазвичай, десятки ватів для електроніки);
- ККД: помірний (10–50 %), різко падає з відстанню;
- безпека: суворий контроль ЕМП, особливо для РЧ-методів. Гарантування безпеки людей та тварин у зоні дії. Регламенти FCC, ICNIRP;

Ключові вимоги: управління променем/фокусування (для РЧ), компенсація розладу резонансу, складна електроніка, питання безпеки та регулювання.

2.3. Далека зона (Far-Field):

Опис: передача на відстанях, що значно перевищують розмір антен (метри – кілометри). Використовує *спрямовані електромагнітні хвилі* (лазери, НВЧ-випромінювання).

Фізика: перетворення енергії у вузьконаправлений промінь (лазер або НВЧ), уловлювання променя приймальною антеною (фотовольтаїка для лазера, ректену – для НВЧ).

Приклади проєктів/застосування:

- космос: передача енергії з орбітальних СБС (Сонячні космічні електростанції – концепти JAXA, Caltech, ESA) на Землю; живлення супутників/зондів від материнського корабля;
- БПЛА: підзарядка дронів у польоті від наземної станції чи іншого дрона (PowerLight Technologies, DARPA проєкти);
- віддалені об'єкти: живлення IoT-сенсорів, метеостанцій у важкодоступних місцях;
- військові: бездротова передача енергії на полі бою.

Основні параметри/вимоги:

- дальність: метри – кілометри (теоретично до орбіти і далі);
- потужність: може бути дуже високою (кіловати-мегавати для СБС);
- ККД: низький (одиночі – десятки відсотків на *всьому* ланцюжку "генерація – передача – прийом – перетворення"). Великі втрати на розбіжності променя та атмосферні ефекти;
- безпека: критичний чинник. Небезпека високоінтенсивного променя (термічне ураження, uszkodження очей для лазерів, вплив НВЧ на живі організми). Вимагає виняткових заходів безпеки (захищені коридори, миттєве вимкнення при порушенні променя).

Ключові вимоги: надточне наведення та відстеження променя, найвища ефективність перетворювачів, вирішення проблем атмосферної інтерференції (особливо для лазерів), подолання нормативно-правових бар'єрів безпеки.

3. Комерційні рішення та стандарти

3.1. Qi (Wireless Power Consortium – WPC):

Опис: домінуючий світовий стандарт для *індуктивної та резонансної* (базова версія) зарядки малопотужних пристроїв (<15Вт для базового, до 50–100Вт+ у розробці/специфічних реалізаціях).

Історія/Динаміка: заснований у 2008 р. Став де-факто стандартом для смартфонів (з Apple iPhone 8/X у 2017 р.). Постійний розвиток: збільшення потужності, покращення позиціонування (EPP), додавання резонансного режиму.

Параметри:

- потужність: 5 Вт (Baseline), 15Вт (Extended Power Profile), до 50Вт + (спеціальні профілі);
- частота: ~100–205 кГц (низькочастотний діапазон);
- дальність: міліметри – сантиметри (індукція), до ~4-5 см (резонанс у специфікації);
- ККД: 70–80 % у добрих умовах.

Практичне застосування: повсюдне. Зарядні станції в аеропортах, кафе, автомобілях, меблях. Пристрої: смартфони, навушники, годинники, гаджети. Головна перевага – універсальність та сумісність.

Ресурси: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/>

3.2. AirFuel Alliance (Об'єднання AirFuel Resonant та PMA):

Опис: консорціум, що просуває магнітно-резонансну (Magnetic Resonance) та радіочастотну (RF) технології для більшої гнучкості (відстань, позиціонування, одночасне заряджання декількох пристроїв).

Історія/динаміка: утворено в 2015 р. злиттям Alliance for Wireless Power (A4WP, резонанс) та Power Matters Alliance (PMA, індукція). Фокус змістився на резонанс і РЧ як альтернативу/доповнення Qi. Комерційне проникнення значно поступається Qi, але є нішеві застосування (громадські зарядки в Starbucks, деякі ноутбуки Dell / Lenovo, медичні/промислові рішення).

Параметри (резонанс):

- потужність: до 65Вт (і вище у специфікаціях);

- частота: 6,78 МГц (ISM band);
- дальність: до 5 см (стандарт), реальні реалізації можуть працювати на 10–20 см зі зниженим ККД;

- ККД: порівняємо з Qi при контакті, краще при несуміщенні/великій відстані.

Параметри (RF):

- потужність: мілівати – одиниці Ватт (для зарядки);
- частота: зазвичай 900 МГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц;
- дальність: метри;
- ККД: дуже низький (одиниці відсотків), підходить тільки для малопотужних пристроїв (IoT-датчики, слухові апарати).

Практичне застосування:

- резонанс: публічні зарядні зони (кафе, аеропорти), заряджання ноутбуків/планшетів, промислові/медичні програми (що вимагають гнучкості позиціонування);
- RF: бездротові датчики, мітки, малопотужні пристрої (де заміна батарейки складна), слухові апарати. *Не* підходить для швидкого заряджання смартфонів.

Ресурси: <https://www.airfuel.org/>

3.3. WiTricity (Технологія та компанія):

Опис: піонер у комерціалізації *сильнозв'язаного магнітного резонансу* (Highly Resonant Wireless Power Transfer). Засновано на роботах MIT (2007).

Історія/динаміка: засновано у 2007 р. для ліцензування технології. Ліцензіати включають виробників автокомпонентів (для EV), медичного обладнання, споживчої електроніки. Технологія лежить в основі резонансного режиму AirFuel і частково вплинула на розвиток резонансу Qi. Фокус на додатках з вимогою більшої дистанції/гнучкості, ніж індукція (EV, роботи, медичні імпланти).

Параметри:

- аналогічні AirFuel Resonant (частота ~100 кГц – 10 МГц;
- дальність до ~10–20 см (при хорошому ККД для потужних систем).

Практичне застосування: системи бездротової зарядки електромобілів (SAE J2954 заснований частково на цій технології), промислові AGV, медичні імпланти, спеціалізовані споживчі та промислові рішення.

Ресурси: <https://witricity.com/>

4. Ключові ресурси для глибокого занурення

Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ/ITU):

- сектор радіозв'язку (ITU-R): вивчайте звіти та рекомендації робочої групи 5B (WP 5B) "Wireless power transmission technologies and systems". Вони охоплюють усі аспекти, включаючи безпеку, сумісність, методи. <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5b/Pages/default.aspx>;

- шукайте конкретні звіти серії "ITU-R SM." (Spectrum Management) та "ITU-R M." (Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services), що стосуються БПЕ.

IEEE:

- журнал IEEE Transactions on Power Electronics: Ключові наукові публікації за схемами, методами управління, проєктування котушок;

- IEEE Journal of Electromagnetics, RF і Microwaves in Medicine and Biology: для медичних додатків БПЕ;

- IEEE Microwave Magazine: оглядові статті з сучасних технологій, включаючи БПЕ далекої зони (НВЧ, лазери);

- конференції: IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE International Microwave Симпозіум (IMS).

Консорціуми:

- Wireless Power Consortium (WPC – Qi): <https://www.wireless power consortium. com /> (Специфікації, списки сертифікованих пристроїв);
- AirFuel Alliance: <https://www.airfuel.org/> (Специфікації, новини, кейси).

Книги (фундаментальні):

- Kurs, A. et al. (2007). Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. Science (основна стаття MIT);
- Sample AP, Meyer DT, & Smith JR (Eds.). (2015). Wireless Power Transfer: Principles and Engineering Explorations. CRC Press. (Гарний огляд різних технологій);
- Bosshard R., & Kolar JW (2016). Inductive Power Transfer: System Analysis and Optimization. Springer. (Поглиблено в індукцію);
- Shinohara N. (2014). Wireless Power Transfer via Radiowaves. Wiley. (Фокус на дальній зоні, НВЧ).

Оглядові статті (IEEE, Nature Electronics):

- шукайте огляди по "wireless power transfer", "wireless charging", "microwave power transmission", "laser power beaming", "wireless power for implants / IoT /EV".

Новинки та аналітичні портали:

- Wireless Power Technology (<https://www.wirelesspowertransfertechnology.com/>);
- Charged EVs (розділ про бездротову зарядку EV) (<https://chargedevs.com/>);
- IEEE Spectrum (<https://spectrum.ieee.org/>). – Пошук за ключовими словами.

Висновок

БПЕ – область, що активно розвивається, де технологія визначається застосуванням. Контактна/ближня зона (Qi) стала масовим ринком завдяки зручності. Стандарти (WPC Qi, AirFuel) і дослідження (під егідою ITU, IEEE) критично важливі для забезпечення сумісності, ефективності та безпеки.

Список літератури:

1. Офіційний сайт консорціуму WPC: Переваги технології Qi [Електронний ресурс]. URL: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/benefits/>
2. IEEE Journal of Electromagnetics, RF i Microwaves in Medicine and Biology [Електронний ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=7507313>
3. Sample A.P. Wireless Power Transfer : Principles and Engineering Explorations / A.P. Sample, D.T. Meyer, J.R.Smith (eds.). Boca Raton : CRC Press, 2015. 358 p.
4. Офіційний сайт WiTricity : Промислова автоматизація [Електронний ресурс]. URL: <https://witricity.com/applications/industrial-automation/>
5. Офіційний сайт AirFuel Alliance : Програми. Небезпечні середовища [Електронний ресурс]. URL: <https://www.airfuel.org/technology/applications/>
6. Офіційний сайт Bombardier Primove [Електронний ресурс]. URL: <https://primove.bombardier.com/>
7. Caltech Space Solar Power Project [Електронний ресурс]. URL: <https://www.spacesolar.caltech.edu/>.
8. Рік. MCE- R SM.2303-1 (05/2021). Бездротова передача енергії з використанням засобів радіозв'язку = Wireless power transmission using radiocommunication means [Електронний ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.2303>
9. Робоча програма MCE-R 5B: Робота з бездротовою передачею енергії (WPT) = ITU-R WP 5B Work on WPT [Електронний ресурс]. URL: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5b/Pages/default.aspx>
10. Рік. MCE-R SM.2392-0 (10/2022). Методи вимірювання систем бездротової передачі енергії для застосування в радіозв'язку = Measurement techniques of wireless power transmission systems for radiocommunication applications [Електронний ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.2392> (дата звернення: 30.05.2024).
11. Shinohara N. Wireless Power Transfer via Radiowaves. Chichester : Wiley, 2014. 232 p.
12. Офіційний сайт Консорціуму бездротового живлення (WPC – Qi) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/>
13. Офіційний сайт AirFuel Alliance [Електронний ресурс]. URL: <https://www.airfuel.org/>
14. Офіційний сайт WiTricity [Електронний ресурс]. URL: <https://witricity.com/>
15. SAE J2954: 202010. Бездротова передача енергії для легкових електромобілів = Wireless Power Transfer for Light-Duty Electric Vehicles [Електронний ресурс]. URL: https://www.sae.org/standards/content/j2954_202010/

16. Офіційний сайт Drayson Technologies : Технологія Freevolt [Електронний ресурс]. URL: <https://www.draysontechnologies.com/technology/freevolt>
17. Офіційний сайт ElectReon : Динамічний бездротовий заряд електромобілів [Електронний ресурс]. URL: <https://electreon.com/>
18. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems (TBioCAS) [Електронний ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=4157303>.
19. Офіційний сайт JAXA: Системи космічних сонячних електростанцій (SSPS) = JAXA: Space Solar Power Systems [Електронний ресурс] URL: <https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/ssps.html>
20. Офіційний сайт EKA: Ініціатива SOLARIS = ESA: SOLARIS Initiative [Електронний ресурс]. URL: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS
21. Офіційний сайт PowerLight Technologies (Лазерна передача енергії) = PowerLight Technologies (Laser Power Beaming) [Електронний ресурс]. URL: <https://powerlighttech.com/>
22. Офіційний сайт Emrod : Бездротова передача енергії на великій відстані = Emrod : Long-Range WPT [Електронний ресурс]. URL: <https://emrod.energy/>
23. Офіційний сайт uBeam (Ультразвукова передача енергії) = uBeam Ultrasound WPT) [Електронний ресурс]. URL: <https://ubeam.com/>
24. IEEE Transactions on Antennas and Propagation (TAP) [Електронний ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=8>
25. ICNIRP Guidelines. Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz) [Електронний ресурс] // Міжнародна комісія із захисту від неіонізуючих випромінювань (ICNIRP). URL: <https://www.icnirp.org/en/publications/index.html>
26. IEEE Transactions on Power Electronics [Електронний ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=63>
27. IEEE Microwave Magazine [Електронний ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6668>

Надійшла до редколегії 19.07.2025

Відомості про авторів:

Воргуль Олександр Васильович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри мікропроцесорних технологій і систем; Україна; e-mail: oleksandr.vorgul@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7659-8796>

Ігнатюк Іван Валентинович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр кафедри мікропроцесорних технологій і систем; Україна; e-mail: ivan.ihnatiuk@nure.ua

Мачоніс Томас Володимирович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр кафедри мікропроцесорних технологій і систем; Україна; e-mail: tomas.machonis@nure.ua

Шуніборов Олег Дмитрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр кафедри мікропроцесорних технологій і систем; Україна; e-mail: oleh.shuniborov@nure.ua