

## РЕЗОНАНСНА СИСТЕМА БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

А.В. Вдовиченко\*, канд.техн.наук

ТОВ «Росток Прилад ЛТД», НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,

пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,

Е-mail: [ltrostok@gmail.com](mailto:ltrostok@gmail.com).

Проведено огляд існуючих типів бездротових технологій передачі електроенергії за допомогою електромагнітної взаємодії. За типом взаємодії виділено системи, що використовують магнітну, електричну та електромагнітну складову. За дальністю виокремлено системи ближньої, середньої та дальньої дії. Як перспективну для впровадження в майбутніх безпілотних системах, в роботі розглядається модифікована система бездротової передачі електричної енергії з використанням електричного поля. Наведено схему та розглянуто принцип роботи такої системи. Досліджено характеристики резонансних контурів, що використовуються як випромінювачі та приймачі в такій системі. Наведено результати вимірювання параметрів просторового розповсюдження електричного поля резонаторів. Досліджено взаємодію спектральних складових вхідного сигналу та резонансних характеристик випромінюючих контурів. Представлено метод визначення ефективності передачі електричної енергії на високих частотах та наведено результати вимірювання ККД передачі для досліджуваного типу систем. Зроблено висновок про наявність діючого фактору у вигляді змінного електричного поля, особливість розповсюдження якого дає змогу створити пристрій, придатний для живлення безпілотних мобільних систем малої та середньої потужності. Бібл. 11, рис. 4, табл. 2.

**Ключові слова:** змінне електричне поле, резонанс, бездротова передача енергії.

**Вступ.** В крайньому десятилітті розвиток бездротових технологій передачі електричної енергії прискорюється. Цьому процесу сприяє зростання продажів електромобілів, постійний розвиток ринку портативної електроніки та потреба у збиранні (harvesting) електромагнітної енергії. Очікується, що загальний ринок бездротових зарядних пристроїв досягне 13,4 млрд.\$ до 2026 року з показником середнього зростання в 24,6% між 2021 і 2026 роками [1]. Вартість технології, певні конструктивні обмеження та повільніша, порівняно з провідною, зарядка є обмежуючими факторами. Нові дослідження по збільшенню дальності та ефективності передачі мають створити додаткові можливості для подальшого розвитку. Дана **робота має на меті** розглянути існуючі типи бездротових технологій передачі електроенергії та провести їх систематизацію, оцінити характеристики і можливості використання резонансної системи бездротової передачі електричної енергії з використанням електричного поля.

**1. Опис систем бездротової передачі електричної енергії.** Технологічні рішення реалізації безпроводної передачі електричної енергії за допомогою електромагнітної взаємодії представлені у табл. 1. Найбільшого розповсюдження здобули рішення, що використовують магнітне поле простого або резонансного типу [2], які розробляють такі фірми, як WiTricity, Sony, Fulton Innovation та інші. Дальність роботи резонансних систем  $D_{range}$  не перевищує десяти лінійних розмірів випромінюючого контуру  $D_{ant}$ . В цих системах наявний вплив на біологічні об'єкти досліджується в межах європейської метрологічної програми для інновацій та досліджень EMPIR та ін. [3]. Головний недолік таких систем – це вимога до центрально-осьового орієнтування, що робить деякі застосування, наприклад, підзарядку в русі – нераціональними.

**Таблиця 1**

	Поле ближньої дії <i>Near – field</i>	Поле середньої дії <i>Mid- Field</i>	Поле дальньої дії <i>Far-field</i>
Діюча складова	Магнітне поле ( <i>Inductive</i> )	Резонанс магн. поля ( <i>Resonant inductive</i> )	Електромагнітне випромінювання (радіохвилі, ФАР, ректени, лазери)
	Електричне поле ( <i>Capacitive</i> )	Резонанс електр. поля ( <i>Resonant capacitive</i> )	
Відстань	$D_{range} \leq D_{ant}$	$D_{range} \leq 10 \cdot D_{ant}$	$D_{range} \geq \lambda$
Вплив	Низький	Середній	Високий

Рішення, що використовують електромагнітне випромінювання, реалізують фокусування вузького променя електромагнітної енергії з довжиною хвилі  $\lambda$  на приймачі за допомогою ФАР, ректен, лазерів та ін. [4] Можлива дальність таких систем є найбільшою, проте біологічний та матеріальний вплив у випадку неточного позиціонування – надзвичайно високий. Наразі для практичного використання придатні системи лише малої потужності.

Системи, що використовують електричне поле, розробляють фірми Murata, Solace Power та ін. [5]. Дальність передачі близька до безрезонансних систем з використанням магнітного поля. В зв'язку з особливостями розповсюдження електричного поля всередині біологічних об'єктів найперспективнішою областю використання є медицина.

Потенційно для майбутніх впроваджень можна виділити резонансні системи з використанням електричного поля. Ці системи широко не представлені, проте вони можуть знайти застосування для зарядки мобільних пристроїв або засобів транспортування. Особливо перспективними вони виглядають для використання в безпілотних космічних місцях. Одним з перших прикладів таких систем є розробки Ніколи Тесли, що існували у вигляді експериментальних пристроїв [6]. В дослідженні [7] було виявлено, що випромінювання в таких пристроях може містити складову змінного магнітного поля та електромагнітну складову без суттєвого їхнього внеску в передачу електричної енергії на відстані, а основним діючим фактором є електричне поле. Недоліком таких пристроїв є те, що передавач та приймач послідовно під'єднанні до землі, що формує однопровідну систему передачі електричної енергії, в якій земля виконує роль провідника.

**2. Модифікована система передачі енергії з використанням електричного поля.** Як було вказано у [8] та [9], можливо перейти від однопровідної системи передачі електричної енергії до повністю безпровідної. Характеристики такої модифікованої системи потребують дослідження, розглянемо принцип її побудови. На рис. 1 зображено схему модифікованої бездротової резонансної системи з використанням електричного поля, де передавач 1 та приймач 4 виконані у вигляді котушок-резонаторів високої добротності, що мають гвинтову одношарову намотку, один полюс яких залишається непідключеним. До 1 послідовно підключено генератор 2 високої частоти, який підключений до заземлення 3, а приймач 4 складається з приймаючої котушки, до якої послідовно підключено котушку, яка виступає в якості заземлення.

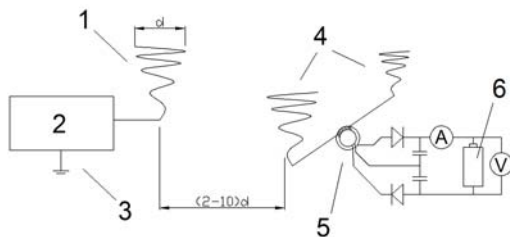


Рис. 1

Передача енергії досягається тим, що просторове розповсюдження змінного поля 1 наводить різні змінні заряди в резонаторах 4. Різниця миттєвих зарядів досягається або завдяки різній відстані від 1, або зменшенням ефективної площі в одній з половин 4, що реалізується конструктивною різницею будови, тобто їхніми лінійними розмірами або формами поверхонь. Отримана різниця миттєвих зарядів в 4 створює різницю напруг, що під час підключенні до полюсів навантаження 6 призводить до появи електричного струму в останньому. Для практичного використання та отримання рівнів напруг, які є прийнятними для перетворення в постійний струм (що необхідно для більшості мобільних пристроїв, які використовують проміжне зберігання енергії в конденсаторах, суперконденсаторах або акумуляторах), необхідно проводити підключення резонаторів через струмовий трансформатор у зворотному включенні 5, вихід якого подається на полюси навантаження. Оптимальна відстань між 1 та 4 складає від 2 до 10 габаритних розмірів  $d$  передавача.

Котушки-резонатори повинні мати однакову частоту власного резонансу, при цьому їхня форма в залежності від використання системи може бути різною. Наприклад, вони можуть бути виконані у формі поверхні плоского диску, конуса, циліндра або експоненти обертання. Резонансна котушка, побудована в такий спосіб, є високовибірковою, має високий коефіцієнт  $Q$ , а потужність її передачі та прийому обмежується самонагріванням. На вільному кінці котушки виникають великі рівні напруги, викликані коливальними процесами. Це вимагає особливої уваги до ізоляції кінців, а також до загального рівня безпеки під час роботи. Проведемо дослідження характеристик таких резонаторів.

**3. Дослідження характеристик резонансних контурів.** Дослідження характеристик випромінювання здійснено за допомогою вимірювача рівня електромагнітного поля Aktakom АТТ-8509, що має діапазон вимірювання напруженості електричного поля від 0.01 до 200 В/м, та щільності потоку енергії від 0.001 до 99.999 Вт/м<sup>2</sup>.

Для випромінюючого контуру з резонансною частотою 565,8 кГц, зовнішнім діаметром  $d_{ant}=0,2$  м, прикладено середньоквадратичною напругою генератора 100 В та потужністю споживання 25 Вт за фонових показників напруженості електричного поля 4,5 В/м та щільності потоку енергії 0,06 Вт/м<sup>2</sup> проведено вимірювання напруженості електричного поля та щільності потоку енергії в двох протилежних напрямках від центру резонуючого контуру. Графіки апроксимацій зміни напруженості електричного поля  $E$  та щільності потоку енергії  $P$  в залежності від відстані  $L$ , що побудовані відносно усереднених значень  $E_{mean}$  та  $P_{mean}$  результатів серії вимірювань в точках на певних відстанях в різних напрямках від центру випромінювача, представлені на рис. 2.

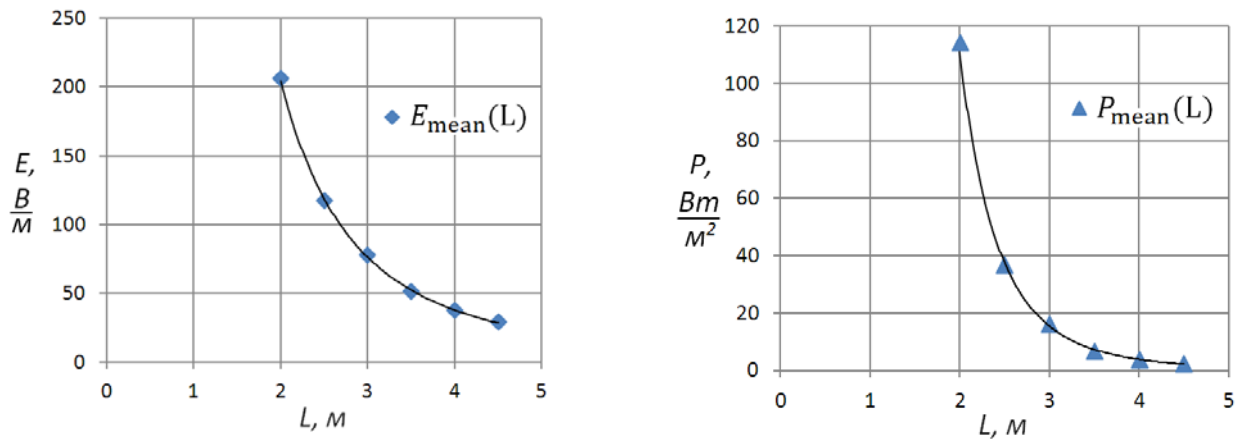


Рис. 2

Рівняння апроксимуючої кривої зміни усереднених значень напруженості електричного поля  $E_{mean}$  в залежності від відстані  $L$ , визначено з величиною достовірності апроксимації  $R^2 = 0,9993$  за формулою

$$E_{mean}(L) = \frac{473,5}{(L - \Delta_L)^{2,014}}, \quad (1)$$

де  $\Delta_L = 0,5$  м – корекція відстані від межі енергетичного центру, що визначена аналітично, задля забезпечення кратності степеневі апроксимації.

Рівняння апроксимуючої кривої зміни усереднених значень щільності потоку енергії  $P_{mean}$  в залежності від відстані  $L$  визначено з величиною достовірності апроксимації  $R^2 = 0,999$  за формулою

$$P_{mean}(L) = \frac{591,94}{(L - \Delta_L)^{4,018}}. \quad (2)$$



Рис. 3

Для додаткового візуального дослідження характеристик поля використано люмінесцентну газорозрядну лампу. Напруженості поля достатньо для її іонізації, а просторове розповсюдження поля відповідає руху струму  $i$ , отже, світінню в лампі. Інтенсивність випромінювання контролюється зсувом частоти від резонансу та зміною амплітуди напруги живлення.

Розглянемо модель люмінесцентної газорозрядної лампи в електричному полі випромінювача на рис. 3, де розповсюдження напруженості електричного поля представлено як послідовність кіл, пропорційних межам дії рівнів цього поля, що кратно спадають обернено пропорційно квадрату відстані. Як видно для лампи, що знаходиться перпендикулярно в площині резонатора, може існувати зона, де різниця потенціалів мінімальна. Це область, де на її межах змінні струми одночасно витікають або

втікають з двох протилежних сторін, не пересікаючи її, а різниця напруженості недостатня для іонізації газу лампи. Ця область має відповідати темній плямі у світінні люмінесцентної газорозрядної лампи, спричиненого дією електричного поля випромінювача, що підтверджується експериментальною перевіркою. У разі збільшення інтенсивності випромінювання темна пляма зникає.

Враховуючи результати вимірювання, діючим фактором є змінне електричне поле із сферичною діаграмою направленості. Напруженість електричного поля зменшується обернено пропорційно квадрату відстані, а щільність потоку енергії має обернену залежність четвертого ступеня від відстані.

Підсилюючий генератор формує меандр, що розкладається на безкінечний ряд затухаючих непарних гармонік. Дослідження спектральних та резонансних характеристик резонуючих контурів здійснено за допомогою спектрального аналізатора RIGOL DSA815 та цифрового осцилографа

$n$	$f_z$ , кГц	$f_{рез}$ , кГц	$K_n$
1	146,7	146,7	1
3	440,1	384,6	0,87
5	733,5	609,4	0,83

SIGLENT SDS1102CML. Результати дослідження резонансних частот антени з формою поверхні експоненти обертаня представлені у табл. 2. Як видно з даних таблиці, кожна наступна резонансна частота  $f_{рез}$  відстає від частоти гармоніки  $f_z$  кратного непарного номера  $n$  на певний коефіцієнт уповільнення  $K_n$ , що змінюється, збільшуючи уповільнення з кожним наступним

номером гармоніки  $n$ . Співвідношення коефіцієнтів уповільнення змінюється в залежності від форми поверхні антени. Така зміна послідовності резонансних частот властива багатьом резонансним системам та процесам таким, як резонанс Шумана [10] або акустичний резонанс звукопідсилюючих рупорів [11]. Це пов'язано з наявністю частотної нелінійності і може бути використано для неруйнівного аналізу стану антени.

Випромінювання вищих гармонік, які присутні в напрузі підсилюючого генератора, буде послаблюватися все сильніше з кожною наступною гармонікою, а отже, їхній вплив буде мінімальним або відсутнім. Повністю виключити вплив вищих гармонік можна, використовуючи підсилюючий генератор, вихідний сигнал якого є чистою синусоїдою.

**4. Дослідження коефіцієнта корисної дії передачі енергії.** Робочі частоти для таких резонансних систем лежать в діапазоні 100кГц-2МГц. Вони обмежені знизу практичними габаритами випромінювачів, а зверху – межами працездатності силових напівпровідникових елементів. Точне вимірювання прохідної потужності на таких частотах є складним завданням. Наявність будь-яких паразитних ємностей значно збільшує невизначеність результату. Визначення коефіцієнта корисної дії потребує вимірювання активних потужностей, що споживає випромінювач та поглинає навантаження. Враховуючи, що в резонансному режимі фазовий зсув між струмом та напругою відсутній або несуттєво малий, коефіцієнт корисної дії передачі визначено шляхом вимірювання та збереження за допомогою цифрового осцилографа масиву миттєвих значень струму та напруги на випромінювачі та приймачі з подальшою математичною обробкою для визначення їхніх активних потужностей. Враховуючи потенційну наявність паразитних втрат, для контролю вимірювання активної потужності приймача пропонується безконтактний метод вимірювання, який полягає в тому, що використовуються покази люксметра, освітленого лампою розжарювання, яка виконує роль навантаження. Лампа розжарювання та люксметр попередньо відкалібровані на змінному струмі промислової та високої частоти. Покази люксметра в залежності від активної потужності лампи розжарювання та частоти струму представлено на рис. 4. Встановлено, що відносна похибка визначення активної потужності на високих частотах таким методом не перевищує 10%.

При формі випромінювача та приймача у вигляді експоненти обертаня з резонансною частотою 136 кГц та діаметром 0,5 м, ККД передачі на відстані 1,5 м склав 69,5 %, а на відстані 2м – 50,5% незалежно від напрямку взаємного розташування та за оптимального

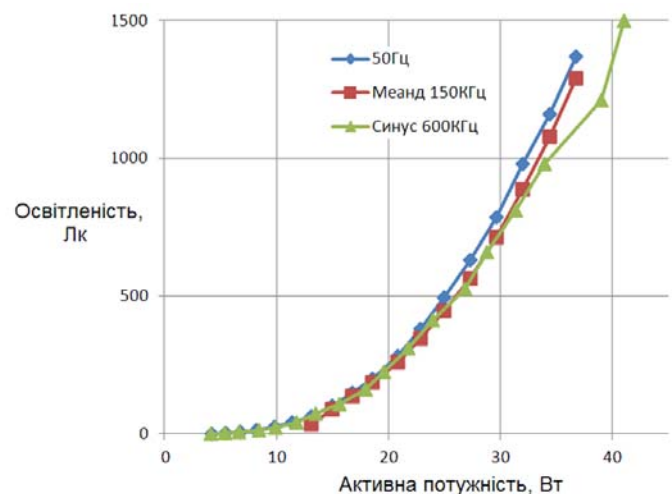


Рис. 4

навантаження. При контурах аналогічної форми з резонансною частотою 1,3 МГц та діаметром 0,14 м, ККД передачі енергії на відстані 0,8 м склав 35%, а на відстані 1 м – 25,75%. Така ефективність є прийнятною для підзарядки безпілотних систем малої та середньої потужності у випадку складності або неможливості використання класичних методів.

Залежність ККД передачі від рівня активної потужності, що передається, не виявлена. Існує пряма залежність між ККД передачі та площею поверхні резонуючого контуру певної форми. Таким чином, збільшення площі випромінювання шляхом намотки резонатора дротом більшого діаметру, що збільшувало розміри та площу випромінювача, або підключення додаткового резонуючого контуру до генератора пропорційно збільшувало ККД передачі на аналогічній відстані, що може додатково свідчити про смісний характер передачі електричної енергії.

#### **Висновки.**

1. Проведено короткий огляд та систематизацію сучасних бездротових технологій, де висвітлено позицію резонансних систем з використанням електричного поля. Наведено приклад модифікованої резонансної системи для передачі енергії з використанням електричного поля.

2. Досліджено характеристики резонансних контурів модифікованої системи. Визначені особливості випромінювання резонаторів та їхні спектральні складові. Зроблено висновок про наявність діючого фактору у вигляді змінного електричного поля та можливі шляхи зменшення випромінювання вищих гармонік.

3. Досліджено ефективність передачі резонансної системи з використанням електричного поля. Наведено метод визначення ККД передачі в різних режимах та для різних типів включень.

4. Враховуючи особливості конструкції, дальність та ефективність передачі модифікованої системи, можна зробити висновок щодо її придатності до використання, а саме: можливість переходу від однопровідної схеми передачі електричної енергії до повністю бездротової дає змогу створити пристрій, придатний для живлення безпілотних мобільних систем малої та середньої потужності; використання струмового трансформатора на вході ланцюга навантаження дає можливість організувати просте перетворення змінного струму в постійний, що особливо важливо в мобільних системах; випромінювання передавача не залежить від відносної просторової орієнтації випромінювальних та приймальних ланцюгів, що відкриває можливість для створення безконтактних датчиків та пристроїв, які можуть розміщуватися на рухомих деталях механізмів, де неможливе підведення постійного живлення, що є перспективним для використання в безпілотних космічних місіях.

1. Wireless charging market research. *Markets and markets*. 2021. SE 2963. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/wireless-charging-market-640.html> (дата звернення 5.03.2023).
2. Joannopoulos J.D., Karalis A., Soljacic M.. Wireless non-radiative energy transfer. Патент США № 10666091, 2020.
3. Zucca M., Loader B., Schmidt M., Welinder J., Tammi K., Bruna Romero J., Pichon L., Freschi F., Bauer P., Blandow V., Maffucci A., Femia N., Kuster N. The project Metrology for Inductive Charging of Electric Vehicles. Conference on *Precision Electromagnetic Measurements* (CPEM-2018). Paris, France, 08-13 July 2018. Pp. 770–771. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501202>
4. Shyma S., Sindhuja E., Wireless Power Transmission from Solar Power Satellite. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2014. Vol. 5. Issue 2. Pp. 20–25.
5. Nagesh Polu, Mohammed Jahangir Alam, Sheikh Mominul Islam, Nima Soltani. Wireless electric field power transfer system, method, transmitter and receiver therefor. Патент США № 0165612, 2019.
6. Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy. Патент США № 649621, 1900.
7. Leyh G.E., Kennan M.D. Efficient Wireless Transmission of Power Using Resonators with Coupled Electric Fields. 40th *North American Power Symposium*. Calgary, AB, Canada, 28-30 September 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAPS.2008.5307364>
8. Vdovychenko A.V., Tuz Y.M. Power Measurement at Wireless Transmission of Electricity in the Frequency Range from 0.01 to 10 MHz. Conference on *Precision Electromagnetic Measurements* (CPEM-2018). Paris, France, 08-13 July 2018. Pp. 75–76. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500807>
9. Вдовиченко А.В. Пристрій бездротової передачі електричної енергії резонансного типу. Патент України на корисну модель № 147692, 2021.
10. Schumann W.O. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. *Zeitschrift für Naturforschung 7A*. 1952. Pp. 149–154. DOI: <https://doi.org/10.1515/zna-1952-0202>

11. Harry F. Olson. Elements of Acoustical Engineering. *Nature* 147, 311. 1941. DOI: <https://doi.org/10.1038/147311a0>.

## RESONANCE SYSTEM OF WIRELESS ENERGY TRANSMISSION WITH USING OF THE ELECTRIC FIELD

A.V. Vdovychenko

LLC «Rostok Prulad LTD», NTU of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,  
Beresteiskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

E-mail: [itdrostok@gmail.com](mailto:itdrostok@gmail.com).

*The paper reviews the existing types of wireless technologies for power transmission using electromagnetic interaction. According to the type of interaction, systems using magnetic, electric and electromagnetic components are distinguished. Short-range, medium-range and long-range systems are distinguished by range. As promising for implementation in future unmanned systems, the work considers a modified system of wireless transmission of electrical energy using an electric field. The scheme is presented and the principle of operation of such a system is considered. The characteristics of resonant circuits used as emitters and receivers in such a system were studied. The results of measuring the parameters of the spatial distribution of the electric field of the resonators are presented. The interaction of the spectral components of the input signal and the resonant characteristics of the radiating circuits was investigated. The paper presents the method of determining the efficiency of electric energy transmission at high frequencies and the results of measurement of transmission efficiency for the studied type of systems. It was concluded that there is an active factor in the form of an alternating electric field, the feature of which propagation allows creating a device suitable for powering unmanned mobile systems of low and medium power. References 11, figures 4, tables 2.*

**Keywords:** alternating electric field, resonance, wireless power transmission.

1. Wireless charging market research. *Markets and markets*. 2021. SE 2963. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/wireless-charging-market-640.html> (accessed 5.03.2023).
2. Joannopoulos J.D., Karalis A., Soljacic M. Wireless non-radiative energy transfer. Patent US No 10666091, 2020.
3. Zucca M., Loader B., Schmidt M., Welinder J., Tammi K., Bruna Romero J., Pichon L., Freschi F., Bauer P., Blandow V., Maffucci A., Femia N., Kuster N. The project Metrology for Inductive Charging of Electric Vehicles. Conference on *Precision Electromagnetic Measurements* (CPEM-2018). Paris, France, 08-13 July 2018. Pp. 770–771. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501202>.
4. Shyma S., Sindhuja E., Wireless Power Transmission from Solar Power Satellite. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2014. Vol. 5. Issue 2. Pp. 20–25
5. Nagesh Polu, Mohammed Jahangir Alam, Sheikh Mominul Islam, Nima Soltani. Wireless electric field power transfer system, method, transmitter and receiver therefor. Patent US No 0165612, 2019.
6. Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy. Patent US No 649621, 1900.
7. Leyh G.E., Kennan M.D. Efficient Wireless Transmission of Power Using Resonators with Coupled Electric Fields. 40th *North American Power Symposium*. Calgary, AB, Canada, 28-30 September 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAPS.2008.5307364>.
8. Vdovychenko A.V., Tuz Y.M. Power Measurement at Wireless Transmission of Electricity in the Frequency Range from 0.01 to 10 MHz. Conference on *Precision Electromagnetic Measurements* (CPEM-2018). Paris, France, 08-13 July 2018. Pp. 75–76. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500807>.
9. Vdovychenko A.V. Electrical energy wireless transmission device of resonance type. Patent for a utility model UA No 147692, 2021.
10. Schumann W.O. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. *Zeitschrift für Naturforschung 7A*. 1952. Pp. 149-154. DOI: <https://doi.org/10.1515/zna-1952-0202>.
11. Harry F. Olson. Elements of Acoustical Engineering. *Nature* 147, 311. 1941. DOI: <https://doi.org/10.1038/147311a0>.

Надійшла 06.02.2023  
Остаточний варіант 15.06.2023