

V.I. ЛУЖАНСЬКИЙ, С.А. КОСТЮК
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ БЕЗДРОТОВИМ СПОСОБОМ В НАВКОЛОРЕЗОНАНСНОМУ РЕЖИМІ

В статті розглянуто область застосування технології бездротової передачі електричної енергії. Проведено аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянуто методи бездротової передачі електричної енергії, а також проведено аналіз існуючих конструкцій пристроїв та обладнання для реалізації процесу бездротової передачі енергії. Запропоновано схему передавально-приймальної системи з використанням антен у вигляді половини геометричної фігури Е. Бельтрамі. Отримано математичні залежності, які описують процес передачі електричної енергії з використанням зазначених антен. Встановлено основні параметри, які впливають на коефіцієнт передачі електричної енергії. Створено малопотужний лабораторний стенд та проведено лабораторні випробування. На основі отриманих результатів побудовано графік залежності зміни прийнятої потужності від відстані між передавальною та приймальною антенами. Визначено коефіцієнт корисної дії запропонованого пристрою. Розглянуто вплив завад (залізобетонних конструкцій тощо) на резонансну частоту передавально-приймальної системи.

Ключові слова: бездротова передача електричної енергії, псевдосферична поверхня, потужність електромагнітної енергії, резонансна частота, коефіцієнт корисної дії.

V.I. LUZHANS'KYY, S.A. KOSTYUK
Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT OF HIGH-EFFICIENT ELECTRIC POWER TRANSMISSION SYSTEMS UNLOCKED IN A RESONANT MODE

In the article examined field of application of the technology of wireless transmission of electric energy. Conducted analysis of recent research and publications. The methods of wireless transmission of electric energy are considered, as well as an analysis of existing designs of devices and equipment for the realization of the wireless transmission of energy. Particular attention is paid to low-power transmission systems for the realization of recharging of low-power devices (for example, a mobile phone). The scheme of the transmitting-receiving system with the use of antennas in the form of half a geometric figure by E. Bertrami is proposed. The mathematical dependences are described that describe the process of transmission of electric energy using the indicated antennas. The basic parameters that influence the transmission coefficient of electric energy are established. A low-power laboratory stand was created and laboratory tests were carried out. On the basis of the obtained results, a plot of the dependence of the change in received power on the distance between the transmitting and receiving antennas is constructed. The coefficient of efficiency of the proposed device is determined. The influence of obstacles (reinforced concrete structures, etc.) on the resonance frequency of the transmitting and receiving system is considered. It is established that the proposed device due to the use of antennas of a special configuration is characterized by relatively high efficiency and opens up new possibilities in the field of reception and transmission of electromagnetic waves.

Keywords: wireless transmission of electric energy, pseudospheric surface, power of electromagnetic energy, resonance frequency, coefficient of performance.

Постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку науки і техніки в світі існує потреба у передачі електричної енергії значної потужності на значні відстані бездротовим методом. Дана задача, в першу чергу, обумовлюється великою кількістю малопотужних споживачів електричної енергії (рис. 1), які потребують періодичної підзарядки, що доставляє певні незручності, особливо під час користування і обмежує їх переміщення під час зарядки, що призводить до зниження їх продуктивності.

Також дане питання актуальне для підзарядки електромеханічних імплантатів людського організму (серце, нирки), підзарядки дронів та робототехніки (рис. 2).

На даний час існує широка гама методів передачі енергії, але у всіх є спільний недолік – мала відстань та коефіцієнт корисної дії (ККД).

Найбільш важливою і трудомісткою частиною задачі передачі енергії є забезпечення високого

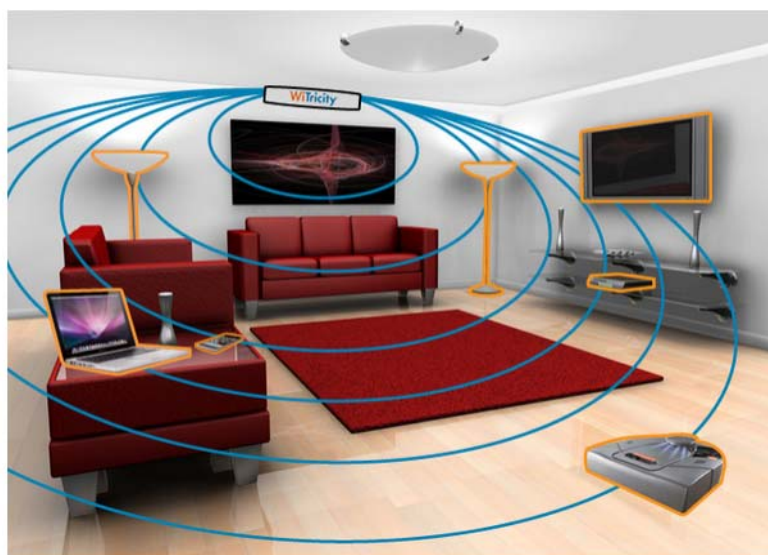


Рис. 1. Споживачі електричної енергії

коефіцієнта передачі та збільшення передавальної відстані, не виходячи за межі допустимого рівня випромінювання (для України 2,5 мкВт/см²).



а)



б)

Рис. 2. Споживачі електричної енергії:
а) дрон; б) робот

Незважаючи на дослідження процесів бездротової передачі енергії як вітчизняними, так і іноземними науковцями в загальному рівень науково-технічного забезпечення для передачі енергії бездротовим методом на значні відстані залишається недостатньо високим [1]. Тому, питання розробки нових та удосконалення існуючих методів і способів передачі енергії на значні відстані є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Передачею електроенергії бездротовим способом цікавляться багато дослідників. Явище бездротової передачі енергії вперше відкрив в 1893 році геніальний винахідник Никола Тесла. Але активно почав розвиватись даний напрямок досліджень на початку ХХ століття багатьма вченими.

Вперше в Росії в 1895 р. О. Попов продемонстрував в роботі перший в світі радіоприймач, що за великим рахунком теж є бездротовою передачею енергії.

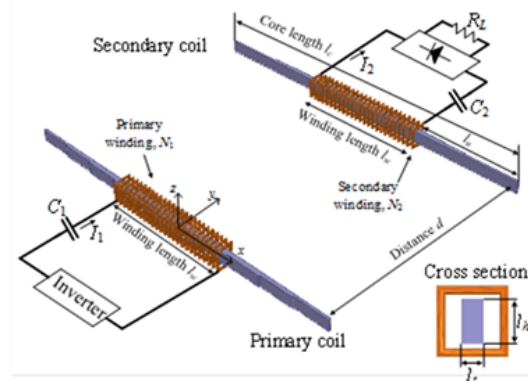
Так, в 1904 р. на виставці St. Louis World's Fair (в Сент-Луїсе, штат Міссурі, США) був вручений цінний приз групі винахідників за успішний запуск електродвигуна літака потужністю 60 Вт на відстані до 30 метрів.

У 1975 р. у Каліфорнії вчені зуміли передати на відстань 60 метрів 10 кВт електроенергії у мікрохвильовому діапазоні з ККД 40 відсотків [2].

Цікаву технологію бездротової передачі енергії (магнітно-резонансна система «Coupled Magnetic Resonance System, CMRS») запропонувала група винахідників з Массачусетського технологічного інституту в 2007 році. На рисунку 3а відображено світліну з першої презентації запропонованої системи. Така система забезпечує передачу електричної енергії на відстань 2,1 метра. Технологія CMRS зіткнулася з деякими обмеженнями, які перешкоджають її впровадженню в масове виробництво: складна конфігурація котушок, великі їх розміри, висока частота передачі і занадто висока чутливість до зовнішніх перешкод, наприклад таких як присутність людини [3].



а)



б)

Рис. 3. Загальна конфігурація:
а) Алансон Сампл з першою презентацією технології CMRS на форумі IDF 2008; б) система DCRS

Відомий спосіб бездротової передачі електроенергії запропонований вченими з Південної Кореї, в

основу якого покладено принцип резонансної системи з дипольних котушок (Dipole Coil Resonant System) DCRS. Система DCRS дозволяє передавати електроенергію на відстань до 5 метрів. Запропонована система позбавлена недоліків притаманних CMRS характеризується вищою завадостійкістю та реалізується за допомогою відносно компактних котушок $10 \times 20 \times 300$ см. Принципова схема системи DCRS наведена на рис. 3б.

Як показали експериментальні випробування, запропонована система дозволила на частоті 20 кГц передати 1400 Вт з ККД 36,9 % на відстань 3 метра і 209 Вт на відстань 5 метрів з ККД 9,2% [4].

Слід відзначити, що незважаючи на переваги запропонованих способів передачі енергії існують спільні недоліки – низькі ККД та завадостійкість.

Відомий спосіб бездротової передачі електроенергії, запропонований групою вітчизняних вчених [5], який дозволяє передавати електричну енергію з коефіцієнтом корисної дії близьким до 100% через вільний простір. Суть запропонованого рішення полягає у тому, що передавальна та приймальна антени виконані у вигляді псевдосфери і утворюють електрично замкнуту систему, яка частково включає в себе енергію електромагнітного поля Землі. За рахунок збудження (активації) електромагнітного поля Землі в системі відбувається передача електроенергії від передавальної до приймальної антени з ККД ≈ 1 . Принципова схема такої системи наведена на рис. 4.

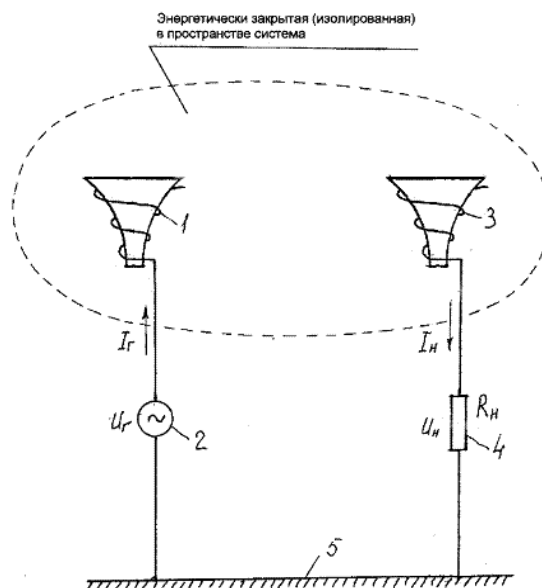


Рис. 4. Принципова схема системи бездротової передачі електроенергії:
1 – передавальна антена; 2 – генератор; 3 – приймальна антена; 4 – перетворювач; 5 – заземлення

Аналіз приведених способів передачі енергії бездротовим методом вказує на перспективність даного напрямку, а також на доцільність проведення досліджень та розробки методик і нових підходів в зв'язку з недостатнім вивченням процесів, а також на розробку пристроїв, які б дозволяли передавати та приймати енергію для живлення і підзарядки малопотужних пристроїв.

Мета статті. Розробка високоефективних систем передачі електричної енергії бездротовим способом в навіолорезонансному режимі з використанням антен у вигляді псевдосфери.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для досягнення поставленої мети в роботі пропонується проводити подальші дослідження в області підзарядки мобільних телефонів та інших пристроїв.

Елементами передавально-приймальної системи є: генератор частоти, підсилювач, вольтметр, а також передаюча та приймаюча антени, які виконані у вигляді фігури Е. Бельтрамі, яка ґрунтується на геометрії гіперболоїда М. Лобачевського. Антени являють собою дві половини просторової геометричної фігури, яка реалізована на базі 5-го постулата геометрії М. Лобачевського: *через точку, яка не лежить на прямій, проходить по крайній мірі дві прямих, які лежать з даною прямою в одній площині і не перетинають її* [6].

Так, в 1863 р. італійський математик Е. Бельтрамі встановив, що всі властивості площини геометрії М. Лобачевського реалізуються на поверхні псевдосфери – геометричного тіла, властивості якого збігаються, або протилежні властивостям сфери. На рис. 5а зображена псевдосфера, а на рис. 5б її твірна – трактриса з асимптотою Х'Х. У разі рівного розподілу радіусів великих кіл (паралелей) псевдосфери і сфери можна кількісно порівнювати об'єми і площі їх поверхонь.

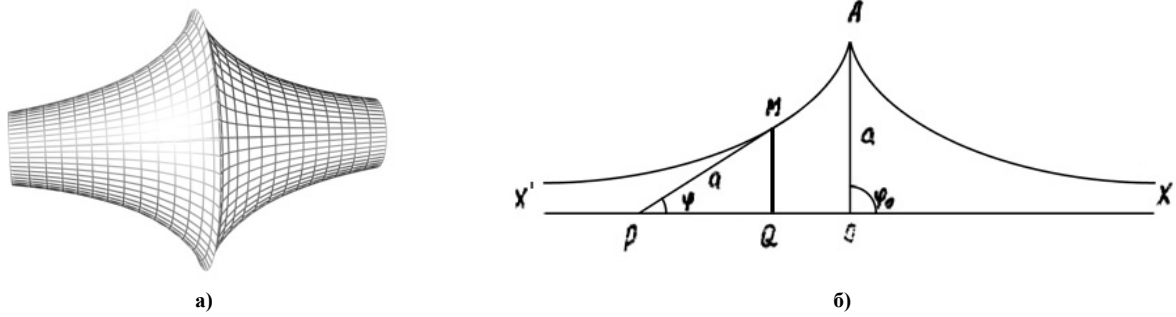


Рис. 5. Параметри псевдосфери:
а) псевдосфера; б) твірна псевдосфери – трактриса

Дана фігура характеризується рядом переваг і являє собою нескінченно протяжене в просторі тіло псевдосфери, яке має кінцевий обсяг і кінцеву площу поверхні. Саме ця властивість псевдосфери дозволяє за допомогою антен-напівпсевдосфер створити кінцеву, обмежену в просторі, енергетично замкнуту систему, що є необхідною умовою для передачі енергії з високим ККД.

Ще однією відмінною рисою є те, що всі точки на поверхні псевдосфери є гіперболічними, розривними в просторі (рис. 6).

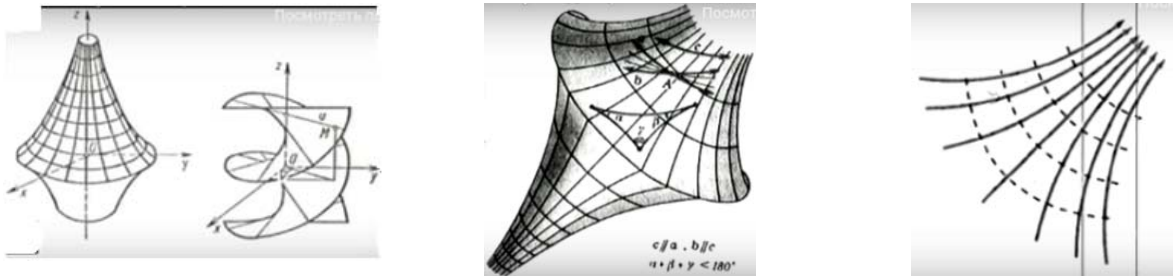


Рис. 6. Особливості гіперболічної площини

Стосовно до антен-напівпсевдосфер передавально-приймальної пристрою це рівносильно розривам – квантуванню електричного і магнітного полів в кожній точці дроту намотки котушок антен. Це призводить до електромагнітних збурень хвиль, довжина яких співрозмірна з діаметром дроту намотування котушок антен, тобто практично довжина таких хвиль становить величину порядку 1 мм і менше. Такі електромагнітні хвилі, як свідчить теорія і практика, здатні через поляризацію молекул повітря або безпосередньо активізувати електромагнітне поле Землі і тим самим компенсувати втрати електромагнітної енергії на шляху передачі, чим і досягається підвищення ККД.

Також відомо, що така конструкція антен дозволяє поєднувати в собі принцип сповільнюючих систем [5], за рахунок чого досягається зменшення довжини хвилі і формування біжучих хвиль на невеликих відстанях.

Проаналізувавши усі переваги та властивості псевдосферичної випромінюючої поверхні, можна стверджувати, що просторово-часовий стан випромінювання електромагнітних полів носить імперсональний характер.

Для передачі електричної енергії розроблено передавально-приймальну систему, принципова схема якої відображена на рис. 7.

Основними параметрами системи є потужність на вході та виході системи, напруженість електромагнітного поля, резонансна частота, ємність та індуктивність котушок антен.

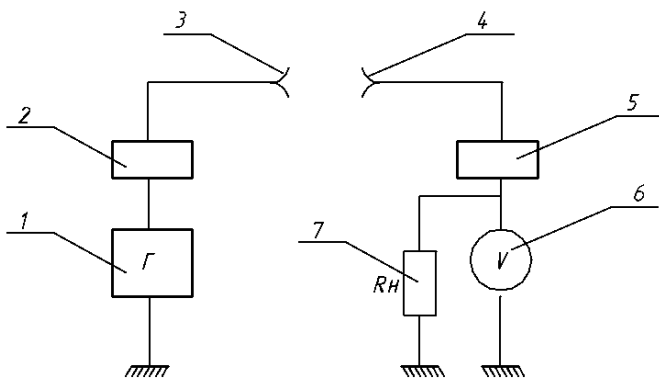


Рис. 7. Принципова схема передавально-приймальної системи:
1 – джерело електроенергії (генератор); 2 – підсилювач; 3 – передавальна антена; 4 – приймальна антена;
5 – перетворювач змінно-постійної напруги; 6 – вольтметр; 7 – активне навантаження

Відомо, що потужність випромінювання електромагнітної енергії за одиницю часу через замкнену поверхню визначається за відомою формулою:

$$\oint [\vec{E}\vec{H}]dS = \oint \vec{P}dS, \tag{1}$$

де \vec{P} – вектор об'ємної щільності потоку електромагнітної енергії, вектор Пойтінга; dS – елементарна площа замкненої поверхні; \vec{E} – вектор напруженості електричного поля; \vec{H} – вектор напруженості

магнітного поля.

Враховуючи, що $E=H/120\pi$, де 120π – хвильовий опір простору 375 Ом, а інтеграл поверхні dS – елементарна площа замкненої поверхні:

$$\int dS = S_C = 4\pi r^2, \tag{2}$$

де S_C – площа сфери; r – радіус сфери.

Вектор напруженості електричного поля \vec{E} з врахуванням (1) може бути визначений [5]:

$$\vec{E} = \frac{\sqrt{30P}}{r}, \tag{3}$$

де P – потужність електромагнітного поля.

При відомих P та r дана формула є базовою при розрахунках напруженості електричного поля.

З врахуванням теореми Гауса-Остроградського для напів-псевдосферичної антени процес безпроводної передачі електричної енергії можна описати залежністю:

$$P_T \rightarrow \frac{1}{4} \int_{V_C} \text{div}[\vec{E}\vec{H}] dV_C - \frac{1}{4} \int_{V_{C\oplus}} \text{div}[\vec{E} \oplus \vec{H} \oplus] dV_{C\oplus} = \frac{1}{4} \int_{V_{C\ominus}} \text{div}[\vec{E}\ominus\vec{H}\ominus] dV_{C\ominus} - \frac{1}{4} \int_{V_C} \text{div}[\vec{E}\vec{H}] dV_C \rightarrow P_{II}, \tag{4}$$

де P_T – потужність генератора; P_{II} – прийнята потужність; $1/4$ – числовий коефіцієнт, який зв'язує об'єм сфери V_C та півпсевдосфери V_{II} і описується рівністю: $\frac{1}{4}V_C = \frac{1}{2}V_{II}$ [5].

Резонансна частота визначається за формулою:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \tag{5}$$

де L – індуктивність антени; C – власна паразитна ємність.

Для дослідження процесу передачі енергії згідно з запропонованою схемою (рис. 7) створено експериментальну установку, принципова схема якої наведена на рис. 8.

Експериментальна установка складається з передавальної та приймальної систем. Передавальна система містить джерело електричної енергії, генератор з можливістю регулювання частоти, підсилювача та передавальної антени. Приймальна система складається з приймальної антени, перетворювача напруги та активного навантаження.

Робота пристрою здійснюється наступним чином: передавальна антена 2 збуджується джерелом (генератором) електричної енергії 1 і випромінює сповільнену електромагнітну хвилю. За рахунок антени 3 (приймальної) приймається енергія електромагнітної хвилі і перетворюється у постійну напругу за рахунок перетворювача. Заземлення необхідне для збільшення струму на виході приймальної системи.

Значення L та C антен визначались експериментально і складали відповідно: $L = 9$ мГн; $C = 4$ пф. Потужність на виході генератора складала 20 Вт. Частота розраховувалась за формулою (5) і складала $f = 840$ кГц.

Дослідження процесу передачі енергії проводились з варіюванням відстані між передавальною та приймальною антенами. Результати експериментальних досліджень зведені в табл. 1.

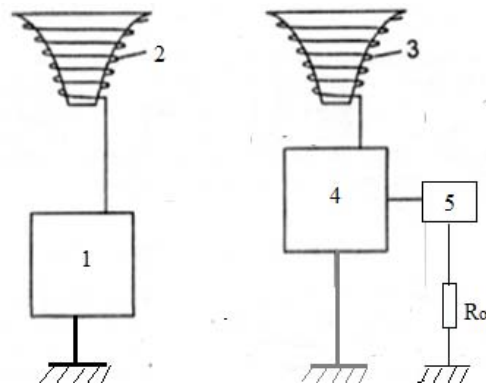


Рис. 8. Принципова схема експериментальної установки для бездротової передачі електроенергії: 1 – джерело електроенергії (генератор); 2 – передавальна антена; 3 – приймальна антена; 4 – перетворювач змінно-постійної напруги; 5 – споживач; R_0 – опір провідника (користувача)

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

Відстань між передавальною та приймальною антенами l , м	Прийнята потужність P_{II} , Вт	Коефіцієнт корисної дії, %
1	17	85
1.2	15	75
1.4	9	45
1.6	5.5	27.5
1.8	3	15
2.0	1.2	6
2.2	0.8	4

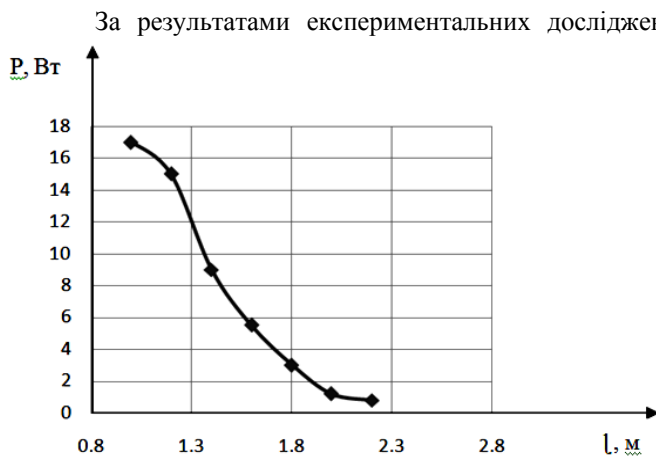


Рис. 9. Графік залежності зміни прийнятої потужності від відстані між передавальною та приймальною антенами

передавальним системам для реалізації підзарядки пристроїв малої потужності (наприклад мобільного телефону).

Запропоновано схему передавально-приймальної системи з використанням антен у вигляді половини геометричної фігури Е. Бельтрамі. Створено малопотужний лабораторний стенд та проведено лабораторні випробування. Отримано графік залежності зміни прийнятої потужності від відстані між передавальною та приймальною антенами. Встановлено, що зі зростанням відстані між передавальною та приймальною антенами від 1 метра до 2,2 метра прийнята потужність становить від 17 Вт до 0,8 Вт відповідно, при цьому коефіцієнт корисної дії зменшується від 85% до 4%.

Встановлено, що запропонований пристрій за рахунок використання антен особливої конфігурації характеризується відносно високим коефіцієнтом корисної дії та відкриває нові можливості в області прийому та передачі електромагнітних хвиль.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виявлення впливу завад (залізобетонні конструкції тощо) на процес передачі енергії та резонансну частоту передавально-приймальної системи.

Література

1. Передача электроэнергии без проводов от начала до наших дней [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://habr.com/ru/post/373183>.
2. Бельдїй М.М. Без дротів та розеток / М.М. Бельдїй // Винахідник та раціоналізатор. – 2018. – № 2. – С. 4–10.
3. A Kurs, A. Karalis, R. Moffatt. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. URL: <http://science.sciencemag.org/content/317/5834/83.full>
4. Беспроводная передача энергии на 5 метров [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://habr.com/ru/post/219857/>
5. Патент на винахід 116145 Україна, МПК N01Q 19/00. Пристрій для передачі електроенергії через вільний простір / Крюк В.Г., Яцишин В.А., Бельдїй М.М. ; заявл. 13.07.2004 ; опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.
6. Геометрия М. І. Лобачевского // Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М. : Советская энциклопедия, 1969–1978.

References

1. Peredacha elektroenerhii bez provodov ot nachala do nashih dnei [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://habr.com/ru/post/373183>.
2. Beldii M.M. Bez drotiv ta rozetok / M.M. Beldii // Vynakhidnyk ta ratsionalizator. – 2018. – № 2. – S. 4–10.
3. A Kurs, A. Karalis, R. Moffatt. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. URL: <http://science.sciencemag.org/content/317/5834/83.full>
4. Besprovodnaya peredacha energii na 5 metrov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://habr.com/ru/post/219857/>
5. Patent na vynakhid 116145 Ukraina, MPK N01Q 19/00. Prystrii dlia peredachi elektroenerhii cherez vilnyi prostir / Kriuk V.H., Yatsyshyn V.A., Beldii M.M. ; zaiavl. 13.07.2004 ; opubl. 15.02.2007, Biul. № 2.
6. Geometriya M. I. Lobachevskogo // Bolshaya sovetskaya enciklopediya : [v 30 t.] / gl. red. A.M. Prohorov. – 3-e izd. – M. : Sovetskaya enciklopediya, 1969–1978.

Рецензія/Peer review : 18.6.2019 р.

Надрукована/Printed : 18.7.2019 р.

Стаття рецензована редакційною колегією