

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.5>

УДК: 621.396.961

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

И.Б. Широков, И.В. Сердюк, П.П. Овчаров, А.А. Азаров, Е.И. Широкова

**Севастопольский государственный университет,
институт Радиоэлектроники и информационной безопасности
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33**

Статья поступила в редакцию 1 июля 2021 г.

Аннотация. Исследована передача энергии между двумя параллельно расположенными прямоугольными микрополосковыми спиралями в диапазоне частот 140-300 МГц. Контроль изменения расстояния между линиями осуществляется путем измерения КСВ. Результаты моделирования показали, что потери энергии не снижаются ниже 1 дБ при изменении расстояния между спиралями в диапазоне от 5 до 17 мм.

Ключевые слова: микрополосковая линия, прямоугольная спираль, беспроводная передача энергии.

Abstract. The transfer of energy between two parallel rectangular microstrip spirals in the frequency range 140-300 MHz is investigated. Control of changes in the distance between the lines is carried out by measuring the SWR. The simulation results showed that the energy loss does not decrease below 1 dB when the distance between the spirals changes in the range from 5 to 17 mm.

Key words: microstrip line, rectangular spiral, wireless power transmission.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФИ и Севастопольского региона, номер проекта 20-48-920001.

Автор для переписки: Широков Игорь Борисович, shirokov@ieee.org

Введение

Современные мобильные телефоны и другие телекоммуникационные устройства имеют возможность беспроводного заряда аккумуляторов. Данная возможность обеспечивается применением стандарта Qi [1, 2]. Согласно этому стандарту, беспроводная передача энергии реализуется с использованием магнитной связи между плоскими индукторами. Система работает на относительно низких рабочих частотах в десятки килогерц. Недостатком такого метода передачи энергии является крайне малый диапазон изменения расстояний между элементами системы. Эффективная передача энергии происходит практически при полном контакте плоских катушек. Уже на расстоянии между катушками в 3-5 мм передача энергии практически полностью прекращается.

Другой метод беспроводной передачи энергии основан на принципе передачи энергии в режиме магнитного резонанса [2, 3]. Радиус действия такой системы значительно больше и достигает нескольких метров. Однако влияние системы передачи энергии на человека и живые организмы в непосредственной близости практически не изучено. Очевидно, что такой подход к решению задачи беспроводной передачи энергии будет небезопасным, особенно если уровень передаваемой мощности достигнет нескольких десятков ватт и более.

Для беспроводной передачи энергии используются также связанные полосковые линии [4-12]. Традиционное решение предполагает использование четвертьволновых отрезков микрополосковых или симметричных полосковых линий передачи, нагруженных на согласованные сопротивления. Надо понимать, что при этом возникает направленная передача энергии с переходным затуханием – 3 дБ в лучшем случае. Другими словами, как минимум, половина всей передаваемой энергии превращается в тепло, выделяемое в балластных сопротивлениях.

Использование связанных резонаторов (в частности, микрополосковых) для беспроводной передачи энергии [4-6] также обладает указанным выше недостатком – большой зависимостью коэффициента связи от взаимного расположения резонаторов. Этот недостаток связан напрямую с тем, что метод

передачи энергии является резонансным, а резонансная частота и другие параметры резонансной системы, расположенной в ближней зоне поля излучения, сильно зависят от взаимного положения резонаторов. Поэтому такой метод передачи энергии может быть эффективен только при фиксированном взаимном расположении резонаторов. Кроме того, даже перестройкой частоты не удастся расширить область взаимного расположения резонаторов, так как резонансная система является узкополосной и ее добротность обратно пропорциональна полосе пропускания.

1. Описание метода

Предложенный в данной работе подход к беспроводной передаче энергии также основан на использовании связанных микрополосковых спиралей, расположенных на диэлектрических подложках, металлизированных с обратной стороны. Спираль возбуждается с внешней стороны, внутренний конец спирали не нагружен, рис. 1.

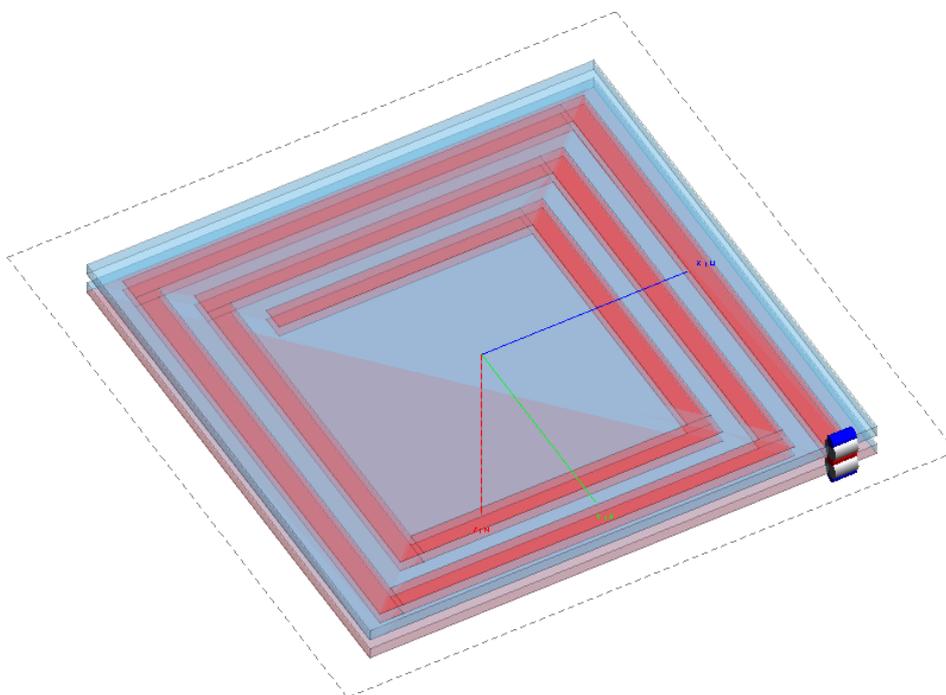


Рис. 1. Модель полосковых резонаторов с лицевой связью

Повышение эффективности передачи энергии достигается за счет того, что длина отрезков микрополосковых линий передачи выбирается кратной нескольким четвертям длин волн. Такая система эквивалентна

последовательному соединению четвертьволновых направленных ответвителей, каждый из которых передает свою долю энергии. Дополнительный выигрыш достигается за счет того, что электромагнитная волна, дойдя до края микрополосковой линии, отражается от него и идет в обратном направлении, также передавая свою часть энергии второму отрезку линии передачи.

Если отрезки микрополосковых линий передачи расположены далеко друг от друга, то передача энергии прекращается и в возбуждаемом отрезке линии передачи возникает режим стоячих волн, характеризующийся высоким значением КСВН, стремящимся к бесконечности. При возникновении такого случая генератор переводят в дежурный режим, снижая мощность до предельно малого уровня, чтобы обеспечивалась возможность измерения КСВН.

Следует понимать, что измеряемый КСВН будет иметь ярко выраженную частотную зависимость. Минимумы КСВН будут наблюдаться строго на фиксированных частотах, значения которых, в свою очередь, будут зависеть от взаимного расстояния между отрезками микрополосковых линий передачи. Соответственно, частоту генерации системы необходимо адаптивно изменять в зависимости от расстояния между отрезками линии передачи, добиваясь минимального значения КСВН возбуждаемого отрезка линии передачи.

2. Расчет коэффициента передачи мощности

Для определения необходимой длины отрезков микрополосковых линий передач проведем расчет коэффициента передачи мощности от одного отрезка к другому в зависимости от электрической длины линии.

В работе [10] показано что, мощность на выходе второй из связанных параллельных микрополосковых линий, расположенных на подложке, когда к первой линии подается мощность, определяется формулой

$$P_2 = \frac{P_1 k^2 \sin^2 \theta}{1 - k^2 \cos^2 \theta}, \quad (1)$$

где θ – электрическая длина параллельных связанных секций линии, k – коэффициент связи для $(W/b)/(h/b) > 0,35$, определяемый по формуле [7]:

$$k = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}}. \quad (2)$$

где:

$$Z_{0o} \sqrt{\varepsilon} = \frac{94,172 \pi h/b}{\operatorname{arctanh} k}, \quad \frac{W}{\pi} = \frac{2}{\pi} \left[\operatorname{arctanh} \sqrt{\frac{k(k-h/b)}{1-kh/b}} - \frac{h}{b} \operatorname{arctanh} \sqrt{\frac{(k-h/b)}{k(1-kh/b)}} \right]. \quad (3)$$

В дополнение к этому, если размеры поперечного сечения таковы, что $W/b \geq 0,35(1-h/b)$, то для расчета волновых сопротивлений могут быть использованы следующие формулы:

$$Z_{0e} \sqrt{\varepsilon} = \frac{59,952 \pi}{[(W/b)/(1-h/b)] + C_e}; \quad (6)$$

$$Z_{0o} \sqrt{\varepsilon} = \frac{59,952 \pi}{[(W/b)/(1-h/b)] + [(W/b)/(h/b)] - C_o}, \quad (7)$$

где $C_e = 0,4413 - H$; $C_o = Hb/h$; $H = \frac{(1-h/b)\ln(1-h/b) + (h/b)\ln(h/b)}{\pi(1-h/b)}$.

Исходя из того, что четвертьволновые участки соединены последовательно и учитывая соотношение (1), то коэффициент передачи каждого участка можно записать в виде

$$\frac{P_2}{P_1} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{k^2 \sin^2 \theta}{1 - k^2 \cos^2 \theta} \right)^i, \quad (11)$$

где N – число полуволн, укладываемых на длине линии.

Так как микрополосковая линия работает в режиме холостого хода, то волна отражается от конца линии и проходит повторный путь к входному порту. Таким образом, можно считать, что электрическая длина линии в два раза больше ее физической длины. С учетом этого выражение (11) принимает следующий вид:

$$\frac{P_2}{P_1} = \sum_{i=1}^{2N} \left(\frac{k^2 \sin^2 \theta}{1 - k^2 \cos^2 \theta} \right)^i. \quad (12)$$

Результаты расчета коэффициента передачи показаны на рис. 2.

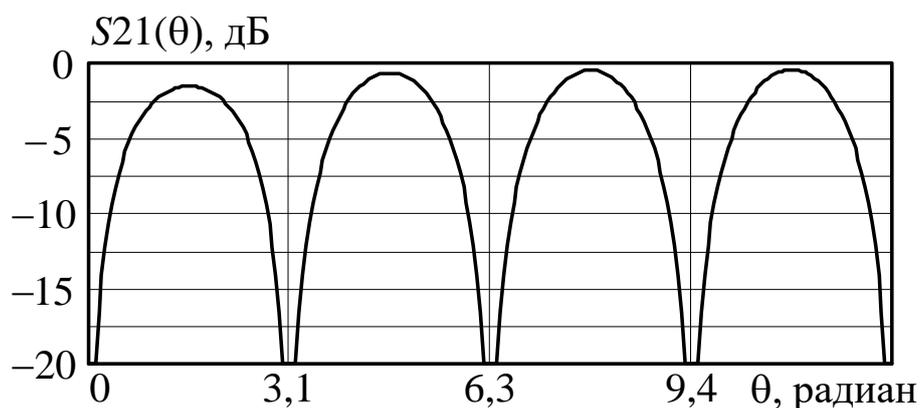


Рис. 2. Результаты расчетов коэффициента передачи

Из рисунка 2 следует, что коэффициент передачи по мощности пропорционален добротности резонансной системы, т.е. зависит от того, сколько раз волна пройдет в прямом и обратном направлении, а также от длины связанных линий. Из рисунка 2 также следует, что длину линий в резонаторе нецелесообразно выбирать больше, чем $5/4$ длины волны [11, 12].

3. Результаты моделирования

Связанные микрополосковые спирали промоделированы в пакете программ Altair Feko. Микрополосковые линии расположены на отдельных подложках 220×220 мм², толщиной 5 мм из поликарбоната ($\epsilon = 3,9$, $\text{tg } \delta = 0,005$), рассчитаны на 50 Ом волнового сопротивления и подключены к портам на краю печатной платы с волновым сопротивлением 50 Ом. Внешние размеры спирали 200×200 мм. Шаг спирали 20 мм, а общая длина микрополосковых линий 905 мм. Между микрополосковыми линиями – свободное пространство ($\epsilon = 1$).

Результаты моделирования коэффициента передачи S_{21} связанных микрополосковых линий для зазора h между микрополосковыми линиями, изменяющегося от 5 мм до 30 мм для частот 140, 160, 180 и 200 МГц показаны на рисунке 3.

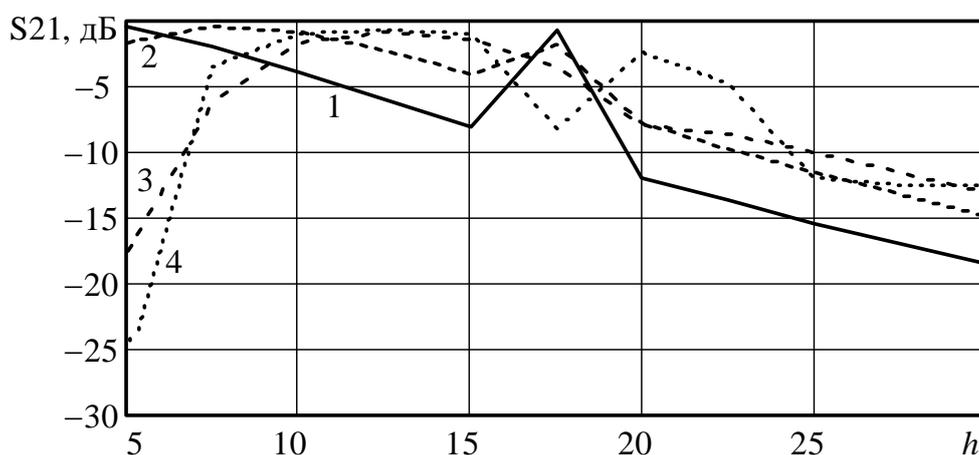


Рис. 3. Результаты моделирования коэффициента передачи на частотах: 1 – 140 МГц, 2 – 160 МГц, 3 – 180 МГц, 4 – 200 МГц

Результаты моделирования коэффициента отражения от входа S_{11} , при тех же параметрах линии передачи и частотном диапазоне показаны на рисунке 4.

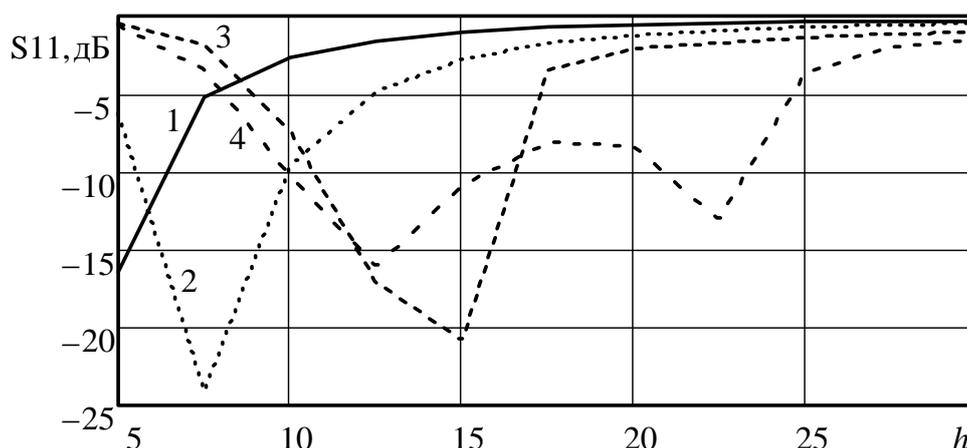


Рис. 4. Результаты моделирования коэффициента отражения от входа линии на частотах: 1 – 140 МГц, 2 – 160 МГц, 3 – 180 МГц, 4 – 200 МГц

Как следует из рисунков 3 и 4, при изменении расстояния между микрополосковыми линиями от 5 до 17 мм коэффициент передачи на уровне не хуже $-1,1$ дБ за счет перестройки частоты передачи от 140 МГц до 200 МГц. При данных параметрах обеспечивается уровень КСВН меньше 2.

Результаты моделирования коэффициента передачи S_{21} связанных микрополосковых линий для зазора h между микрополосковыми линиями, изменяющегося от 5 мм до 30 мм для частот 140 — 200 МГц и расстояний между микрополосковыми линиями от 5 до 30 мм показаны на рисунке 5.

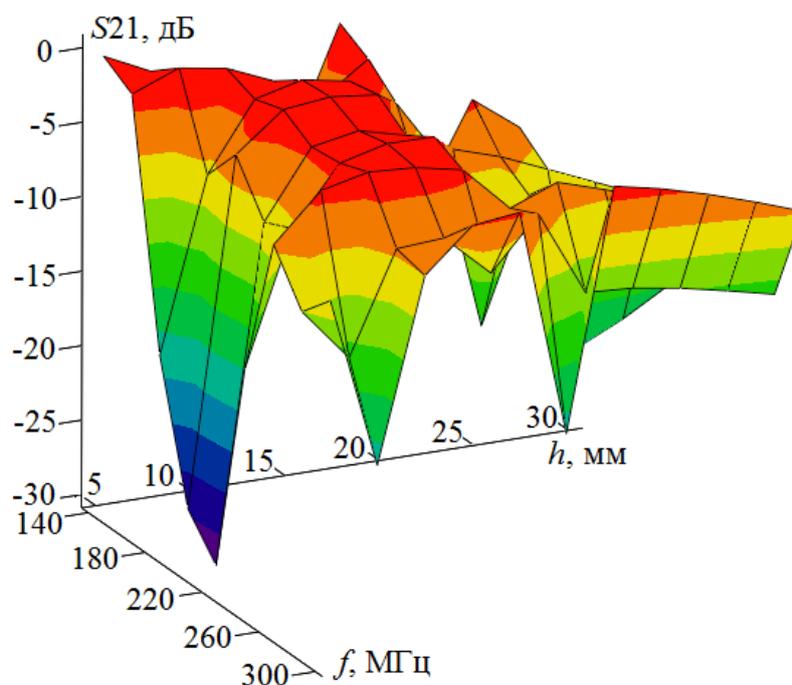


Рис. 5. Результаты моделирования коэффициента передачи связанных микрополосковых линий

Результаты моделирования коэффициента отражения от входа S_{11} связанных микрополосковых линий для зазора h между микрополосковыми линиями, изменяющегося от 5 мм до 30 мм для частот 140—200 МГц и расстояний между микрополосковыми линиями от 5 до 30 мм показаны на рисунке 6.

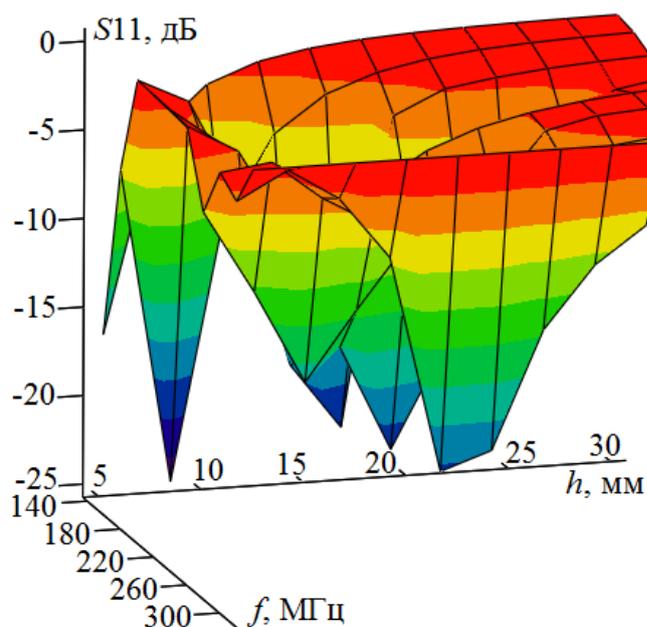


Рис. 6. Результаты моделирования коэффициента отражения от входа микрополосковой линии

Как следует из рисунков 5 и 6, при увеличении расстояния между микрополосковыми спиралями до 20 мм можно обеспечить коэффициент передачи на уровне не менее $-1,5$ дБ, при коэффициенте отражения менее -10 дБ за счет увеличения частоты передачи до 300 МГц.

Заключение

Таким образом, предложен новый подход к проблеме беспроводной передачи энергии, заключающийся в применении связанных микрополосковых линий передачи. Новым в предлагаемом подходе является использование отрезков линии передачи длиной много больше, чем четверть длины волны, как это обычно применяется в направленных ответвителях на связанных линиях передачи. Кроме того, по предлагаемому подходу терминальные балластные сопротивления на концах линий передачи не ставятся, что увеличивает общий КПД системы передачи энергии. Для экономии места отрезки микрополосковых линий передачи сворачивают в спираль.

Проведены аналитические расчеты и осуществлено компьютерное моделирование в пакете прикладных программ устройства беспроводной передачи энергии на основе связанных микрополосковых линий передачи. Результаты аналитических расчетов и компьютерного моделирования совпадают с высокой точностью, что доказывает работоспособность предлагаемого подхода.

Предлагаемая система может быть использована для беспроводной передачи энергии для подзарядки батарей электротранспорта. С наружной стороны днища борта электротранспорта устанавливается приемная часть системы передачи энергии. На столике зарядной станции и/или на дорожном полотне устанавливается передающая часть системы беспроводной передачи энергии. Для осуществления эффективной передачи энергии электротранспорту необходимо только расположиться над передающей частью.

Уникальной особенностью предлагаемого подхода, в отличие от существующих систем передачи энергии, является то, что паразитные излучения

энергии в свободное пространство минимальны за счет сосредоточения распределения энергии в линиях передачи и экранировки линий передачи с обратной стороны диэлектрической подложки. Как микрополосковая линия передачи, так и симметричная полосковая линия передачи, не производят излучений энергии, сопоставимых с уровнем передаваемой энергии. Кроме того, контроль передачи энергии осуществляется по КСВН выхода генератора, и при больших уровнях КСВН передача энергии прекращается.

Автор для переписки: Широков Игорь Борисович, shirokov@ieee.org

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФИ и Севастопольского региона, № 20-48-920001.

Литература

1. *Guidelines for Automotive Aftermarket Qi Chargers*. The Wireless Power Consortium 2012. 2012. 10 p.
2. Global Qi Standard Powers Up Wireless Charging [web]. *CISION PR Newswire*. Дата обращения: 01.05.2021. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-qi-standard-powers-up-wireless-charging-102043348.html>
3. Pchel'nikov Yu.N., Yelizarov A.A., Pchel'nikov A.G. Wireless charging mechanism for outdoor appliance. *IEEE Proc. 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*. 2013. P.1058-1059.
4. Verma S., Rano D., Hashmi M. Enhancing the performance of defected ground structure type near-field radiofrequency WPT system by coupled-line impedance matching. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2020. V.14. №12. P.1431-1439.
5. Agarwal K., Jegadeesan R., Guo Y., et al. Wireless power transfer strategies for implantable bioelectronics. *IEEE Rev. Biomed. Eng.* 2017. V.10. P.136-161.

6. Hekal S., Abdel-Rahman A.B., Jia H., Allam A., Pokharel R.K., Kanaya H. Strong resonant coupling for short-range wireless power transfer applications using defected ground structures. *IEEE Wireless Power Transfer Conference*. 2015. P.1-4.
7. Sorocki J., Piekarz I., Wincza K., Gruszczynski S. Impedance transforming directional couplers with increased achievable transformation ratio. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2017. V.9. P.509.
8. Malyutin N.D., Trenkal E.I., Sychev A.N. An experimental research of the ultra-wideband pulse propagation in a transdirectional coupler based on coupled striplines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V.919. P.017-052.
9. Korotaev V.M., Tuev V.I. Research of directional microwave couplers under conditions of extreme changes in load parameters caused by active element failures and circuit breaks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V.1499. P.012-041.
10. Ганстон М.А.Р. *Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ*. Москва, СВЯЗЬ. 1976. 154 с.
11. Shirokov I.B., Azarov A.A., Serdyuk I.V. The radiating structure of a short-range wireless energy transmission system. *Proc. of the 2018 IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies [FarEastCon'18]*. 2018. 4 p.
12. Shirokova E.I., Azarov A.A., Shirokov I.B. The System of Wireless Energy Transfer. *Proc. of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering [ElConRus'19]*. 2019. P.1065-1069.

Для цитирования:

Широков И.Б., Сердюк И.В., Овчаров П.П., Азаров А.А., Широкова Е.И. Исследование системы беспроводной передачи энергии. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.5>