

УДК 621.3.051.025

Система беспроводной передачи энергии¹

¹ Широков И. Б., ² Широкова Е. И., ³ Азаров А. А.

¹ Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

¹ shirokov@ieee.org

² shirokova@ieee.org

³ azarov@ieee.org

Получено: 20 июля 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: В статье описана система беспроводной передачи энергии. Система состоит из двух микрополосковых структур, каждая из которых не излучает микроволновую энергию в своих отдельных локализациях. При приближении этих структур лицом к лицу они образуют направленный микроволновый ответвитель, который обладает хорошими характеристиками при передаче энергии от одной структуры к другой. Результаты системного моделирования представлены в работе. Моделирование системы проводилось в среде проектирования AWR. Результаты моделирования показали, что потери энергии не превышают 1 дБ на расстоянии между частями системы 10 мм. Были осуществлены моделирования работы системы передачи энергии для различных расстояниях между полосками системы при различных частотах и для различных смещениях микрополосковых структур друг относительно друга. Моделирование показало, что система обладает приемлемыми характеристиками для организации беспроводной передачи энергии. Система может передавать энергию свыше сотен ватт и может использоваться на практике в широком спектре приложений. Наиболее полезным приложением является зарядка батареи автономных устройств, таких как электромобили, беспилотные летательные аппараты и т. д.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; электромагнитное поле; микрополосковая линия передачи; симметричная полосковая линия передачи; переходное затухание; потери.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Широков И. Б., Широкова Е. И., Азаров А. А. Система беспроводной передачи энергии // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 380—389.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Широков, И. Б. Система беспроводной передачи энергии / И. Б. Широков, Е. И. Широкова, А. А. Азаров // Информационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 380—389.

System of wireless energy transfer

I. B. Shirokov¹, E. I. Shirokova², and A. A. Azarov³
Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
¹shirokov@ieee.org
²shirokova@ieee.org
³azarov@ieee.org

Received: July 20, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *The article describes a wireless power transmission system. The system consists of two microstrip structures. They have good performance in transferring energy from one structure to another. The results of system modeling are presented in the paper. System modeling was carried out in the AWR design environment. It is shown the energy loss does not exceed 1 dB at a distance between the parts of the system in 10 mm. Simulations of the operation of the energy transmission system were carried out for different distances between the strips of the system at different frequencies and for different displacements of the microstrip structures relative to each other. Modeling showed that the system has acceptable characteristics for organizing wireless energy transfer. The system can transfer energy for hundreds of watts and use it in practice in a wide range of applications. The most useful application is the battery charging of autonomous devices, such as electric cars, unmanned aerial vehicles, etc.*

Keywords: *wireless power transfer; electromagnetic field; microstrip transmission line; symmetrical strip transmission line; transient attenuation; losses.*

For citation (IEEE): I. B. Shirokov et al. “System of Wireless Energy Transfer,” *Informations and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 380–389, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Электрические транспортные системы быстро растут во всем мире. В последнее время очень популярной транспортной системой является беспилотный летательный аппарат (БПЛА), который широко используется во всех аспектах жизни человека. Однако потребление электроэнергии двигателями БПЛА приводит к разрядке его аккумуляторной батареи.

Стремление к увеличению полезной нагрузки БПЛА приводит к снижению массы батареи и, как следствие, к снижению ее емкости. В результате полезное время работы батареи БПЛА ограничено 1 часом или около того, и, соответственно, с той же периодичностью батарея должна заряжаться.

Контактный метод зарядки батареи обеспечивает решение этой проблемы практически без потерь энергии, однако включает в себя множество других проблем. Прежде всего, частое механическое переключение зарядного разъема резко сокращает срок его службы. Во-вторых, механическое соединение батареи и системы зарядки требует либо присутствия человека на зарядной станции, либо автоматической высокоточной посадки БПЛА на стол зарядной станции. Иногда эти подходы не могут быть реализованы в принципе, например, при обслуживании БПЛА в пустыне. Чистота поверхностей электрических контактов должна быть идеальной.

Беспроводная передача энергии для зарядки аккумуляторной батареи свободна от упомянутых проблем, и зарядка батареи любой транспортной единицы может быть реализована в автоматическом режиме.

2. Беспроводная передача энергии

Первые опыты по беспроводной передаче энергии проводились еще Н. Тесла в конце 19 века [1, 2]. История развития методов беспроводной передачи энергии кратко отражена в [3, 4]. Для передачи энергии используются различные методы. Теория передачи энергии посредством физических полей всесторонне развита в классических работах [5, 6]. Некоторые способы и устройства запатентованы [2, 7, 8].

В последнее время получил распространения индукционный способ передачи энергии, все аспекты которого собраны в так называемый стандарт Qi (Ци) [9, 10]. Подобный подход повсеместно используется сегодня при подзарядке батарей мобильных телефонов. При этом в столике зарядной станции размещают многовитковую катушку, через которую пропускают переменный ток низкой частоты, а в заряжаемом устройстве размещают подобную многовитковую катушку, в которой в свою очередь наводится напряжение индукции, используемое для заряда батарей. При очевидной простоте данного решения, использование двух связанных между собой катушек индуктивности имеет существенный недостаток. Высокий КПД системы достигается только при плотном контакте катушек и при полном совпадении их осей. Любые незначительные отклонения от этого правила приводят к резкому ухудшению эффективности передачи энергии. На расстоянии между плоскостями катушек уже в 5—10 мм передача энергии практически полностью прекращается (опробовано на реальных

беспроводных зарядных устройствах мобильных телефонов). К тому же максимальная мощность зарядной станции по такому подходу не превышает 5—10 Вт [9, 10]. Совершенно очевидным является тот факт, что использовать подобный подход для зарядки батарей автономного электротранспорта не представляется возможным.

Более прогрессивным является магнито-резонансный метод беспроводной передачи энергии, описанный в [11, 12, 13]. За непонятным названием и не менее неясным механизмом (метод запатентован и держится в секрете), скрывается способ передачи энергии без проводников с эффективностью более 40 %. Технология получила название «WiTricity». По заявлению авторов изобретения, это не «чистый» резонанс связанных контуров и не трансформатор Теслы с индуктивной связью. Радиус передачи энергии на сегодня составляет чуть больше двух метров, в перспективе — до 5—7 метров. Сходные технологии разрабатываются и другими фирмами: компания Intel демонстрировала свою технологию WREL с КПД передачи энергии до 75% [3]. В 2009 году фирма Sony продемонстрировала работу телевизора без сетевого подключения. При совершенно очевидном прогрессе в развитии технологии передачи энергии настораживает только одно обстоятельство: независимо от способа передачи и технических ухищрений плотность энергии и напряженность поля в зоне действия зарядной станции должна быть достаточно высокой, чтобы питать устройства мощностью несколько десятков ватт. По признанию самих разработчиков, информации о биологическом воздействии на человека подобных систем пока нет. Учитывая недавнее появление и разный подход к реализации устройств передачи энергии, подобные исследования еще только предстоят, а результаты появятся не скоро. Человечество пока может судить об их негативном воздействии только косвенно. В любом случае при организации систем беспроводной зарядки батарей городского автономного электротранспорта следует строго руководствоваться существующими стандартами, регламентирующими воздействие на человеческий организм электромагнитных полей [14]. Представляется, что описанные выше технологии неприемлемы для массового и повсеместного внедрения на городских улицах и дорогах, особенно если принять во внимание тот факт, что для зарядки батарей электротранспорта требуются мощности, исчисляемые киловаттами и более.

В работах [15, 16] ведется разговор об использовании для передачи энергии магнитных антенн, образованных связанными радиальными спиралями. В работе описываются широкие возможности такого способа передачи энергии, и говорится о вполне приемлемых допусках на взаимное пози-

ционирование антенн системы передачи энергии. Однако конструкция антенн при этом представляется достаточно сложной и в работе не приводится сведений об экспериментальных исследованиях и (или) моделировании процессов передачи энергии. Дальнейшего развития этого направления указанными авторами осуществлено не было, несмотря на его очевидную перспективность, по крайней мере, отследить развитие этого направления не удалось. Представляется, что данное направление является развитием описанного выше магнито-резонансного метода передачи энергии [12, 13].

Передачу энергии с помощью лазерного луча и/или направленного СВЧ излучения в качестве альтернативного варианта передачи энергии для зарядки батарей городского автономного электротранспорта в контексте настоящего проекта авторы не рассматривают по нескольким простым причинам: низкий КПД систем, значительные габариты направленных антенн (как приемной, так и передающей) микроволнового диапазона, неизбежное попадание живых организмов в апертуру луча передачи энергии.

Таким образом, можно сделать несколько предварительных выводов. Ни один из описанных выше способов беспроводной передачи энергии не подходит для реализации системы зарядки батарей электротранспорта. Либо принципиально мала мощность системы, либо сама система оказывается громоздкой, либо проявляется негативное воздействие электромагнитного излучения на людей и другие живые организмы, влияние на которые в настоящее время совершенно не изучено.

3. Новый подход к проблеме

Основной целью исследований является упрощение конструкции элементов беспроводной системы передачи энергии, снижение непроизводительных потерь энергии, обусловленными ее излучением в свободное пространство, потерь в подводящих фидерах и конструктивных элементах генерирующих устройств. Отдельно рассматриваются вопросы снижения вредного влияния энергии высокочастотного излучения на человека и другие биологические объекты, расположенные в непосредственной близости от беспроводной системы передачи энергии.

Предлагается использовать микрополосковую технику для беспроводной передачи энергии [17]. Существуют два типа полосковых линий, представляющие в данном случае интерес. Первый вид — несимметричная или микрополосковая структура. Для этого типа структуры электромагнитное поле сосредоточено исключительно между микрополосковой линией, с ее внутренней стороны и проводящей подложкой. Второй вид включает в себя симметричную полосковую структуру, для которой элек-

тромагнитное поле сконцентрировано между обеими сторонами полосковой линии и обеими проводящими подложками. Обе структуры имеют незначительные потери электромагнитной энергии и не излучают электромагнитную энергию в свободное пространство.

В то же время направленные ответители с приемлемыми качественными параметрами могут быть реализованы на симметричной полосковой линии, и наилучший результат получается при расположении линиями с лицевой связью. В любом случае в структуре можно передавать энергию только от одной полосковой линии на другую. Это свойство симметричной полосковой связанной структуры будет использоваться для беспроводной передачи энергии. Таким образом, система передачи энергии состоит из двух симметричных идентичных частей, каждая из которых представляет собой микрополосковую линию передачи определенной длины, закороченную или открытую на одном конце и возбужденную с другого конца. Для предотвращения непроизводительных потерь энергии в конструкциях не используется согласованная нагрузка 50 Ом (или любое другое сопротивление). Микрополосковые структуры не излучают электромагнитную энергию в свободное пространство; это абсолютно доказанный факт. Соответственно, непроизводительные потери энергии отсутствуют.

4. Конструкция и моделирование

Система как единое целое представляет собой направленный ответитель на симметричных линиях передачи с лицевой связью. Для экономии места полосковые линии свернуты в спирали. Электромагнитная структура была моделирована в среде Microwave Office, модель структуры показана на рис. 1. Для моделирования использовались полосковые линии, открытые с одного конца. С другого конца полосковые линии заканчивались портами 50 Ом (1 и 2).

Полосковые линии размещались на идеальных диэлектрических подложках из диэлектрика с проницаемостью $\epsilon = 4,3$ и $\text{tg}\delta = 0,005$. Толщина подложек составляла 3 мм. Расстояние между полосками изменялось от 5 до 30 мм. Внутренний диэлектрик (между полосковыми линиями) представлял собой воздух с относительной диэлектрической проницаемостью 1. Общая длина обеих полосок составляла около 1 м, ширина составляла 10 мм, а их толщина при моделировании составляла 30 мкм. Размер обеих подложек составлял $200 \times 200 \text{ мм}^2$.

Первая линия возбуждалась через 50-омный порт. При этом анализировалась энергия на выходе второй линии, также заканчивавшейся 50-омным портом.

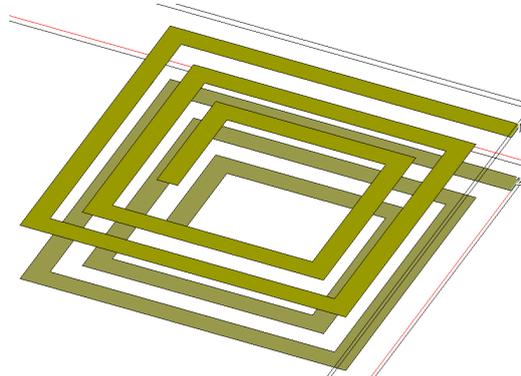


Рис. 1. Электромагнитная структура в МВО.

Fig. 1. Electromagnetic structure in MWO

Результаты моделирования электромагнитной структуры для расстояния между полосковыми линиями 10 мм показаны на рис. 2, а. На этом на рисунке показаны два графика: обратные потери (треугольники) и переходное затухание (ромбы). Очевидно, что наблюдается несколько максимумов при передаче энергии в диапазоне частот. Первый максимум соответствует основной частоте (четверть длины волны полосковой линии). Другие максимумы соответствуют гармоникам основной частоты. Видно, что на гармониках выше третьей переходное затухание не превышает 1 дБ. Результаты моделирования для расстояния 20 мм между полосковыми линиями показаны на рис. 2, б. С увеличением расстояния между полосковыми линиями видно, что частоты максимумов передачи энергии сдвигаются в низкочастотном направлении. Также видно, что коэффициент передачи уменьшается, возвратные потери возрастают.

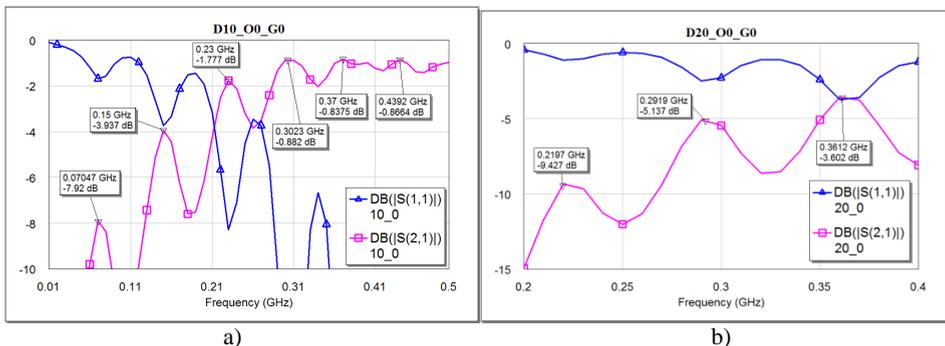


Рис. 2. Результаты моделирования при расстоянии между полосками: а) 10 мм, б) 20 мм.

Fig. 2. Simulation results at a distance between strips: а) 10 mm, б) 20 mm

Было проанализировано переходное затухание при передаче энергии для различных расстояний между полосками и различными частотами. Результаты анализа показаны на рис. 3.

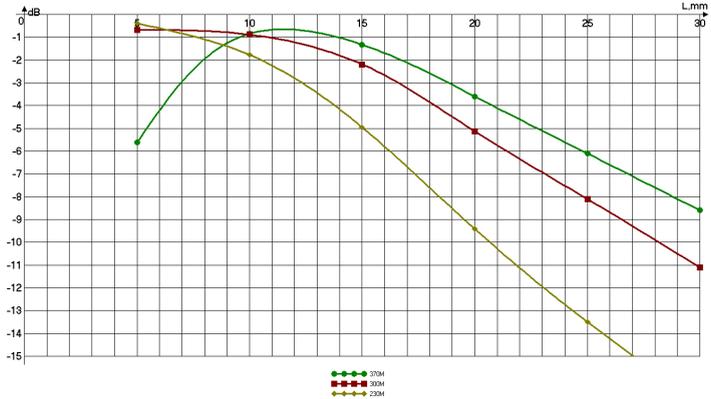


Рис. 3. Результаты моделирования при различных расстояниях между полосками и при различных частотах.

Fig. 3. Simulation results at different distances between strips and at different frequencies

Было исследовано влияние взаимного смещения полосковых структур друг относительно друга на переходное затухание в системе. Результаты моделирования электромагнитной структуры для расстояния между полосковыми линиями 10 мм и взаимным смещением полосковых линий 10 мм и 20 мм показаны на рис. 4.

Ситуация с изменением расстояния смещения несколько лучше.

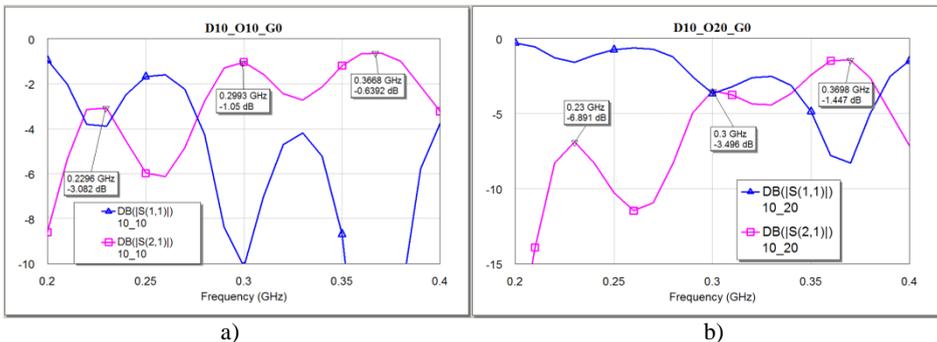


Рис. 4. Результаты моделирования при различных взаимных смещениях полосок: а) 10 мм, б) 20 мм.

Fig. 4. Simulation results at different mutual offsets between strips: а) 10 mm, б) 20 mm

Увеличение взаимного смещения между полосковыми линиями приводит к уменьшению мощности передачи энергии, но это уменьшение не является критическим. Как видно на рисунке, смещение на 10 мм практически не влияет на параметры передачи энергии. Это дает нам «запас» в ошибке взаимного позиционирования электромагнитных структур при решении задач по передаче энергии для подзарядки батарей различных устройств, таких как мобильные телефоны, автономный электрический транспорт и т. д.

5. Заключение

Таким образом, рассмотрена система передачи энергии для беспроводной зарядки батарей. Система состоит из двух микрополосковых структур, которые образуют направленный ответвитель с лицевой связью. Система обеспечивает передачу энергии на разумные расстояния между микрополосковыми структурами. Так, на предельном расстоянии 30 мм между структурами переходное затухание не превышает значения в 10 дБ. На рабочих расстояниях 5—10 мм переходное затухание при беспроводной передаче энергии не превышает 1 дБ.

Использование спиральных микрополосковых линий существенно уменьшает размеры электромагнитных структур и открывает хорошие возможности по снижению требований по взаимному расположению элементов системы беспроводной передачи энергии.

Благодарности

Работы проведены при государственной поддержке в рамках реализации Проекта № 5.6208.2017/8.9 базовой части Государственного задания Российской Федерации.

Список литературы

1. Tesla N. Experiments with Alternating Currents of Very High Frequency and Their Application to Methods of Artificial Illumination // AIEE, Columbia College, N.Y., May 20, 1891.
2. Tesla N., U.S. patent 1,119,732 (1914).
3. Беспроводная передача электроэнергии: трудная история становления (Электронный ресурс) <http://elektrik.info/main/fakty/673-besprovodnaya-peredacha-elektroenergii-trudnaya-istoriya-stanovleniya.html>
4. Brown W. C. The History of Power Transmission by Radio Waves // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on September, 1984, v. 32 (9), pp. 1230—1242.
5. Pozar D. M. Microwave Engineering // Wiley, New Jersey, 2005.
6. Jackson J. D. Classical Electrodynamics // Wiley, New York, 1999.
7. Scheible G., Smailus B., Klaus M., Garrels K., Heinemann L. System for wirelessly supplying a large number of actuators of a machine with electrical power // US patent number 6,597,076, issued in July 2003.

8. Ka-Lai L., Hay J. W., Beart P. G. W. Contact-less power transfer // US patent number 7,042,196, issued in May 2006.
9. Global Qi Standard Powers Up Wireless Charging (Электронный ресурс). <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-qi-standard-powers-up-wireless-charging-102043348.html>
10. Guidelines for Automotive Aftermarket Qi // Chargers The Wireless Power Consortium 2012 2012/10/01
11. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J. D., Fisher P, Soljačić M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // Science, 06 Jul 2007, Vol. 317, Issue 5834, P. 83—86 DOI: 10.1126/science.1143254
12. Karalis A., Joannopoulos J. D., Soljačić M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer // Annals of Physics 323 (2008) P. 34—48.
13. Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords (Электронный ресурс). <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607>
14. IEEE Std C95.1—2005 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency, Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz (IEEE, Piscataway, NJ, 2006).
15. Pchel'nikov Yu.N. Features of slow waves and potential for their nontraditional application // Journal of Communications Technology and Electronics, 2003, vol. 48, No 4, pp. 494—507.
16. 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,” Sevastopol, Crimea, Ukraine, 9—13 September 2013, pp. 1058—1059.
17. Широков И. Б. Способ беспроводной передачи электрической энергии высокой частоты // Патент № 2704602, Россия. МПК H02J 50/20, H02J 50/90, H01Q 7/08. Оpubл. 30.10.2019, Бюл. № 31.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Широкова Елена Игоревна, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Азаров Андрей Андреевич, студент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Information about the authors

Igor B. Shirokov, professor at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Elena I. Shirokova, student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Andrey A. Azarov, student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.