

УДК 621.3.051.025

Увеличение допусков на взаимное смещение элементов системы беспроводной передачи энергии¹

¹ Широков И. Б., ² Сердюк И. В., ³ Азаров А. А., ⁴ Широкова Е. И.

Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

¹ shirokov@ieee.org

² serdyuk@ieee.org

³ azarov@ieee.org

⁴ shirokova@ieee.org

Получено: 5 декабря 2020 г.

Отрецензировано: 10 декабря 2020 г.

Принято к публикации: 12 декабря 2020 г.

Аннотация: В статье представлена система беспроводной передачи энергии. Структурно система состоит из двух микрополосковых линий, не излучающих энергию в пространство в отсутствие парной линии, так как являются фрагментами направленного микроволнового ответвителя. Сближение структур друг относительно друга образует направленный ответвитель. Результаты моделирования, а также экспериментальные исследования были представлены ранее. Представлен комплекс действий, направленных на увеличение допусков на взаимное смещение элементов. Внесенные в систему изменения также позволяют увеличить мощность энергии, передаваемой системой. Значения офсетного сдвига при этом могут быть увеличены до расстояния $W/2$, где W — длина стороны структуры. С учетом того, что актуальным является использование системы беспроводной передачи энергии для решения задачи беспроводной подзарядки аккумуляторных батарей беспилотных летательных аппаратов (далее БпЛА), актуальной является задача увеличения данных параметров до предельных значений.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; электромагнитное поле; микрополосковая линия передачи; симметричная полосковая линия передачи; переходное затухание; потери, беспроводная передача энергии, аккумуляторные батареи, автономный электротранспорт, офсетный сдвиг.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Широков И. Б., Сердюк И. В., Азаров А. А., Широкова Е. И. Увеличение допусков на взаимное смещение элементов системы беспроводной передачи энергии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 277—286.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Широков, И. Б. Увеличение допусков на взаимное смещение элементов системы беспроводной передачи энергии / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, А. А. Азаров, Е. И. Широкова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 277—286.

Increasing the tolerances for the mutual displacement of the elements of the wireless power transmission system

I. B. Shirokov¹, I. V. Serdyuk², A. A. Azarov³, and E. I. Shirokova⁴

Sevastopol State University

33, Universitrskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

¹*shirokov@ieee.org*

²*serdyuk@ieee.org*

³*azarov@ieee.org*

⁴*shirokova@ieee.org*

Received: December 5, 2020

Peer-reviewed: December 10, 2020

Accepted: December 12, 2020

Abstract: *The article presents a wireless power transmission system. Structurally, the system consists of two microstrip lines that do not emit energy into space in the absence of a paired line, since they are fragments of a directional microwave coupler. The convergence of structures relative to each other, forms a directional coupler. The simulation results, as well as experimental studies were presented earlier. A set of actions aimed at increasing the tolerances for the mutual displacement of elements is presented. The changes made to the system also allow to increase the power of the energy transmitted by the system. In this case, the offset values can be increased up to the distance $W/2$, where W is the length of the side of the structure. Taking into account the fact that it is relevant to use a wireless energy transmission system to solve the problem of wireless recharging of batteries for unmanned aerial vehicles (hereinafter UAVs), it is urgent to increase these parameters to near-limit values.*

Keywords: *wireless power transmission; electromagnetic field; microstrip transmission line; symmetrical strip transmission line; crosstalk attenuation; loss, wireless power transmission, rechargeable batteries, autonomous electric transport, offset shift.*

For citation (IEEE): I. B. Shirokov et al. “Increasing the tolerances for the mutual displacement of the elements of the wireless power transmission system,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 277–286, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Системы беспроводной передачи энергии получают в современном мире все большее распространение. Использование данных систем заключается в решении задач подзарядки аккумуляторных батарей, однако сами системы беспроводной передачи энергии делятся на множество видов по различным параметрам. Основные параметры, определяющие тип системы беспроводной передачи энергии и ее применение, это рабочая частота и передаваемая мощность. Данные параметры определяются исходя из емкости подзаряжаемой аккумуляторной батареи, а также расстояний между передающей и приемной частями системы передачи энергии. В среднем емкость аккумуляторной батареи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) гражданского типа собственной массой до 1 кг и продолжительностью полета до 1 часа может составлять порядка 10—20 А/ч. Таким образом, для решения задачи подзарядки аккумуляторных батарей БПЛА ряд современных систем не может применяться по причине малой мощности передачи энергии, малой дальности передачи энергии, а также больших потерь энергии.

Таким образом, одним из важнейших параметров системы беспроводной передачи энергии является ее рабочая дальность действия. Именно этому вопросу в настоящей статье уделяется особое внимание.

Не менее важным параметром системы является так называемый офсетный сдвиг, определяющий расстояние, на которое могут смещаться элементы системы друг относительно друга. В существующих системах взаимный сдвиг структур значительно понижает коэффициент передачи и может быть критичным для решения задачи беспроводной передачи энергии. Надо понимать, что на практике при подзарядке аккумуляторных батарей системы стабилизации и управления положением БПЛА могут не справляться с задачей точной его посадки даже при наличии системы прецизионного позиционирования. Таким образом, возникает необходимость улучшать данные параметры системы беспроводной передачи энергии до предельных значений. Этому вопросу в настоящей статье также уделяется особое внимание.

2. Подход к решению проблемы

Ранее была разработана и представлена система беспроводной передачи энергии на расстоянии до 10 мм [1, 2]. Также был представлен вариант электромагнитной структуры [3] максимально эффективно подходя-

щей для решения данной задачи. В работе [4] представлены математические обоснования применения предложенной структуры. Актуальность и работоспособность представленной системы подробно описана в [5].

В упомянутых выше работах представлены результаты компьютерных моделирований систем передачи энергии в среде MWO AWR Design Environment и результаты экспериментальных исследований. По факту наличия достаточно близких совпадений моделирования и эксперимента был сделан вывод о том, что данная среда разработки дает приближенный к реальным значениям результат. Она может быть использована для предварительного моделирования подобного рода систем при их проектировании, учитывая тот факт, что затраты на изготовление опытного образца реальной системы могут быть существенными.

Основной целью данной работы является улучшение параметров системы передачи энергии, связанных с взаимным смещением ее элементов приема и излучения, описываемых в упомянутых выше работах. Для увеличения расстояния офсетного сдвига была увеличена длина микрополосковой линии. Линия спирали была продолжена во внутреннюю сторону. Это дополнение позволило увеличить расстояние офсетного сдвига до значения половины линейных размеров самой структуры, конечно, с определенными потерями по коэффициенту передачи энергии.

Основной причиной возникновения необходимости улучшения параметров передачи является увеличение мощности системы. Была поставлена задача проверки так называемой масштабируемости системы. При этом мощность системы определялась временем зарядки батарей. Время зарядки было задано равным 30 мин. Исходя из этих характеристик, а также параметров емкости аккумуляторной батареи, было определено значение передаваемой мощности системы беспроводной передачи энергии. Данное значение составляло единицы киловатт. Для определенности будем использовать значение 1 кВт.

Исходя из этого предложенная ранее электромагнитная структура, используемая для системы беспроводной передачи энергии, была модернизирована. Ширина линии, а соответственно и зазор между линиями спирали был увеличен до 70 мм. Толщина диэлектрической подложки при этом была увеличена до 20 мм. При этом физические параметры рассчитывались таким образом, чтобы уменьшить рабочую частоту функционирования системы, что упростит реализацию выпрямительного блока, с учетом увеличения рабочего расстояния передачи энергии.

Внешний вид структуры в среде моделирования AWR Design Environment Microwave office показан на рис. 1. Были проведены исследования для двух расстояний и на пониженных частотах (менее 100 МГц).

Использование предложенной конфигурации также подразумевает увеличение длины микрополосковой линии в сравнении с предложенной ранее. В данном варианте длина микрополосковой линии электромагнитной структуры составляла приблизительно 11 м. При этом размеры одного элемента системы передачи энергии составляли: длина была равна 1250 мм, ширина — 1190 мм. Соответственно рабочая площадь электромагнитной структуры составляла примерно $1,4 \text{ м}^2$. Данное значение выбиралось исходя из известной универсальности применимости системы. Предполагалось также использование данной системы беспроводной передачи энергии для подзарядки батарей городского электротранспорта. При этом один элемент системы устанавливался под днище кузова транспортного средства, другой встраивался в дорожное полотно.

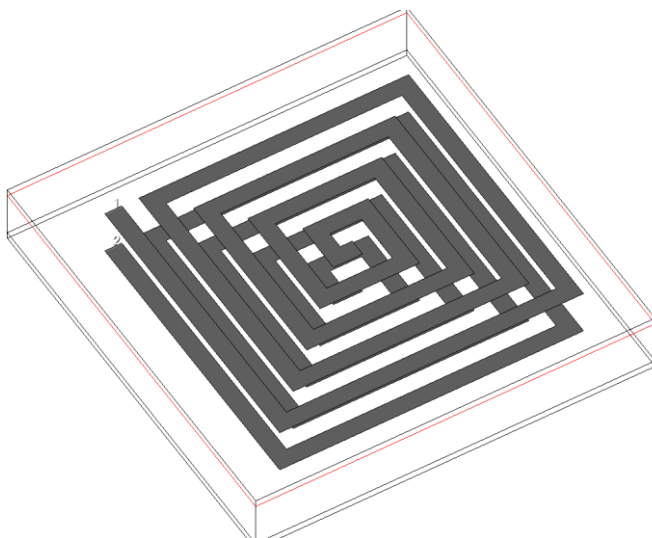


Рис. 1. Электромагнитная структура в МВО.

Fig. 1. Electromagnetic structure in MWO

При этом полагалось, что указанное значение размеров структуры будет минимально возможным для организации беспроводной передачи энергии с указанным значением мощности на расстоянии до 200 мм.

3. Конструкция и моделирование

В работе описывается конструкция системы беспроводной передачи энергии и проводится моделирование ее работы на расстоянии 200 мм и 170 мм между полосковыми структурами.

Также в качестве объекта исследований было решено использовать толщину диэлектрической подложки. Были выбраны значения толщин равные 20 мм и 30 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость подложки была выбрана равной 5.

Исследования влияния сдвигов структур проводились при значениях 140 мм, 280 мм, 480 мм и 620 мм. Указанные структуры и сдвиги показаны на рис. 2 (1 — 140 мм, 2 — 280 мм, 3 — 480 мм, 4 — 620 мм).

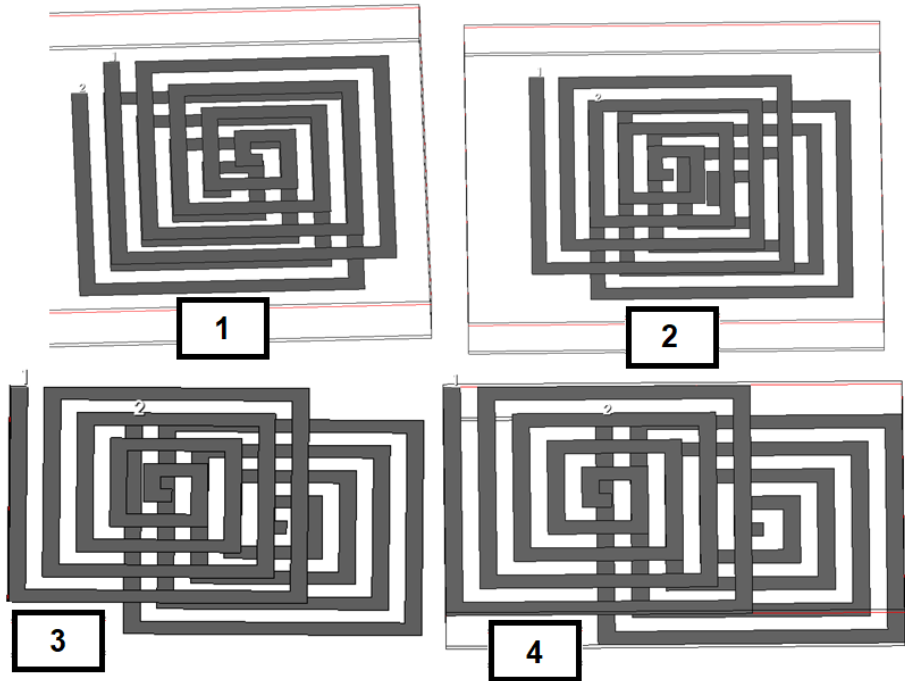


Рис. 2. Смещение структур друг относительно друга в среде МВО.

Fig. 2. Displacement of structures relative to each other in the MVO environment

С учетом всех параметров было построено два графика зависимостей коэффициента передачи от частоты для толщины диэлектрика равной 20 мм и 30 мм для всех сдвигов, показанных на рис. 2. Данные графики показаны на рис. 3 (толщина диэлектрической подложки равна 20 мм) и рис. 4 (толщина диэлектрической подложки равна 30 мм)

По результатам исследований были составлены две таблицы, отображающие полученные зависимости с указанием максимальных коэффициентов передачи в зависимости от рабочей частоты системы. Таблица 1 соответствовала рис. 3, таблица 2 — рис. 4.

В данных таблицах показаны значения частот и коэффициентов передачи для структур с толщинами диэлектрических слоев равных 20 мм и 30 мм на расстояниях между структурами в 170 мм и 200 мм, и при офсетных сдвигах соответствующих 0 мм, 140 мм, 280 мм, 480 мм и 620 мм.

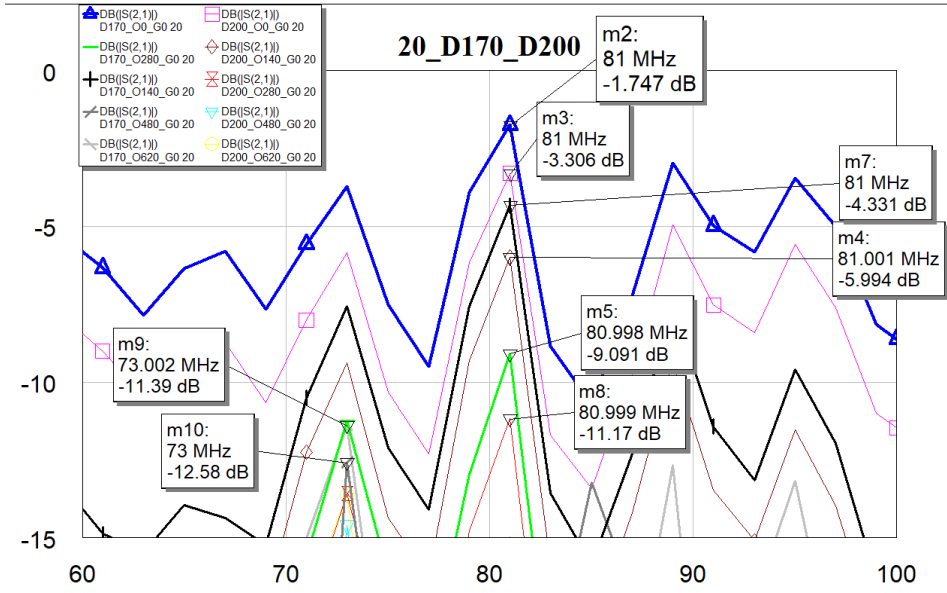


Рис. 3. Результаты моделирования структур при толщине диэлектрика равной 20 мм.

Fig. 3. The results of structures modeling with a dielectric thickness of 20 mm

Таблица 1. Максимальные значения коэффициента передачи для фиксированных частот от офсетных сдвигах структур на расстояниях 170 мм и 200 мм при толщине диэлектрика 20 мм.

Table 1. The maximum values of transmission coefficients at frequencies from offset shifts of structures at distances of 170 mm and 200 mm with a dielectric thickness of 20 mm

$\begin{matrix} \leftrightarrow \\ \updownarrow \end{matrix}$	0 мм	140 мм	280 мм	480 мм	620 мм
170 мм	81 МГц -1.747 дБ	81 МГц -4.331 дБ	81 МГц -9.1 дБ	73 МГц -12.57 дБ	73 МГц -11.3 дБ
200 мм	81 МГц -3.3 дБ	81 МГц -5.9 дБ	81 МГц -11.17 дБ	73 МГц -14.5 дБ	73 МГц -12.58 дБ

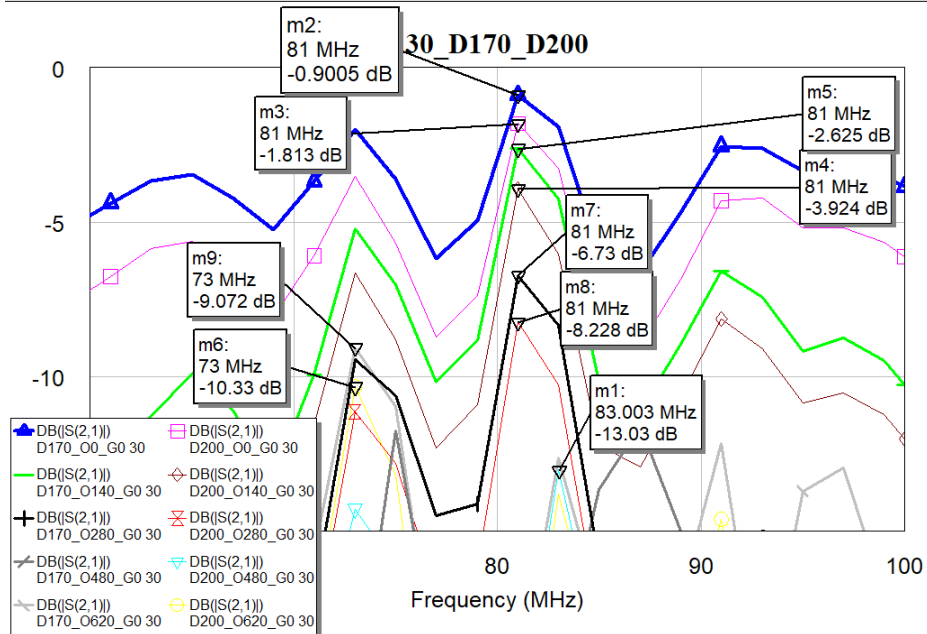


Рис. 4. Результаты моделирования структур при толщине диэлектрика равной 30 мм.

Fig. 4. The results of structures modeling with a dielectric thickness of 30 mm

Таблица 2. Максимальные значения коэффициента передачи для фиксированных частот от офсетных сдвигов структур на расстояниях 170 мм и 200 мм при толщине диэлектрика 30 мм.

Table 2. The maximum values of transmission coefficients at frequencies from offset shifts of structures at distances of 170 mm and 200 mm with a dielectric thickness of 30 mm

$\begin{matrix} \leftrightarrow \\ \updownarrow \end{matrix}$	0 мм	140 мм	280 мм	480 мм	620 мм
170 мм	81 МГц -0.9 дБ	81 МГц -2.6 дБ	81 МГц -6.7 дБ	75 МГц -11.7 дБ	73 МГц -9.02 дБ
200 мм	81 МГц -1.8 дБ	81 МГц -6.7 дБ	81 МГц -8.2 дБ	83 МГц -13.0 дБ	73 МГц -10.3 дБ

На основании полученных в результате исследований данных, которые сведены в таблицы, можно сделать вывод, что система беспроводной передачи энергии может быть использована для подзарядки аккумуляторных батарей повышенной емкости. Использование батарей повышенной емкости предполагает передачу энергии повышенной мощности.

Также из таблиц видно, что использование системы с толщиной диэлектрика, равной 30 мм, дает допустимые значения офсетного сдвига порядка 140 мм на рабочих расстояниях до 200 мм.

4. Заключение

В ходе проведения исследований, представленных в статье, были разработаны компьютерные модели микрополосковых структур, подходящих для подзарядки аккумуляторных батарей как БПЛА, так и автономного городского электротранспорта. Полученные в результате проведенных исследований значения коэффициента передачи энергии на соответствующих частотах указывают на то, что система беспроводной передачи энергии, представленная ранее, является полностью масштабируемой. Простое увеличение геометрических размеров электромагнитных структур приводит к увеличению значения передаваемой мощности и увеличению максимального рабочего расстояния системы передачи энергии при увеличенных возможных сдвигах электромагнитных структур системы.

Можно также сделать вывод, что потери, сопутствующие процессу беспроводной передачи энергии, являются допустимыми при использовании описанных элементов системы.

Предельные значения расстояний между элементами системы передачи энергии были взяты исходя из максимального значения клиренса электромобиля.

Благодарности

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

Список литературы

1. Широков И. Б. Пат. 2704602 (РФ). Способ беспроводной передачи высокочастотной электрической энергии. Оpubл. в Б. И., 2019. № 31.
2. Широкова Е. И., Азаров А. А., Широков И. Б. Система беспроводной передачи энергии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 380—389.
3. Shirokov I., Azarov A., and Serdyuk I. The Radiating Structure of a Short-Range Wireless Energy Transmission System, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602659.
4. Широков И. Б., Азаров А. А., Широкова Е. И. Расчет энергетических параметров полосковой структуры для системы беспроводной передачи энергии. В сб. : Морские технологии и решения — 2020 по материалам II Национальной научно-практической конференции преподавателей и аспирантов «Морские технологии : проблемы и решения — 2020 под общ. ред. Масюткина Е. П. Керчь, Керченский государственный морской технологический университет, 2020. С. 80—82.

5. Широкова Е. И., Азаров А. А., Широков И. Б. Система беспроводной передачи энергии. В сб. : Тр. конференции IEEE 2019 российских молодых исследователей в области электротехники и электроники (ElConRus'19), Санкт-Петербург, Москва, Россия, 28—30 января 2019 г. С. 1065—1069.

Информация об авторах

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

Сердюк Игорь Владимирович, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

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

Широкова Елена Игоревна, студентка 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.

Igor V. Serduk, associate professor Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

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

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