

**Д.С. Козлов, В.М. Тургалиев, В.Н. Яценко, И.Б. Вендик**  
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

## **Двух диапазонный излучатель для системы бесконтактного питания с возможностью передачи информации**

*В работе исследуется возможность разработки системы обмена данными совместно с бесконтактным питанием. Предложено техническое решение такой системы, использующее один излучатель для одновременной передачи энергии и информации на двух некротных частотах. Для анализа эффективности предложенной системы выполнено электродинамическое моделирование излучателей, входящих в ее состав. Изготовлен экспериментальный макет конструкции, характеристики которого были измерены и сравнены с результатами моделирования.*

**Ключевые слова:** беспроводная передача энергии, электромагнитная индукция

В настоящее время количество используемых портативных электронных устройств неуклонно растёт, и каждое из таких устройств время от времени требует подключения к источнику питания для заряда аккумуляторной батареи. Система бесконтактного питания помогает упростить этот процесс, а также сделать его более удобным для потребителя. Система бесконтактного питания может быть использована для любых электронных устройств: мобильных телефонов, цифровых камер, GPS-навигаторов, медицинского оборудования и т.д. Дополнительная возможность передачи информации в подобных системах может обеспечить обнаружение и идентификацию устройств, а также позволяет определять взаиморасположение устройств во время работы [1-2].

В рамках данной работы была рассмотрена система, передача энергии в которой основана на явлении электромагнитной индукции. Данный метод был выбран из-за приемлемой дальности действия (до десятков сантиметров, в зависимости от размеров резонаторов), сохранения работоспособности при появлении посторонних объектов между передающим и принимающим устройствами, а также безопасности данной системы, поскольку биологические ткани слабо взаимодействуют с магнитным полем. В данной работе предлагается использовать для передачи энергии и данных один излучатель, в то время как большинство систем подобного рода используют отдельные излучатели для каждого канала. Данный подход позволит существенно уменьшить габариты системы [3].

Общемировая тенденция построения систем бесконтактного питания основана на том, что для передачи энергии предпочтительно использовать частоты кГц – МГц диапазона, поскольку при значительной мощности излучения более высокие частоты могут быть опасны для здоровья человека. В то же время для передачи информации могут использоваться и более высокие частоты, так как это позволяет увеличить скорость обмена данными между устройствами. В данной статье для сравнения были рассмотрены две системы с использованием различных частотных диапазонов: 150 кГц – для передачи энергии, 13,56 МГц – для обмена данными (система 1) и 13,56 МГц – для передачи энергии и 2,45 ГГц - для обмена данными (система 2) [4].

**Конструкция излучателей.** Выбор формы и размеров передающего и принимающего излучателей (резонаторов), главным образом, обусловлен требованием обеспечения максимальной эффективности передачи энергии. Теоретический анализ показывает, что эффективность определяется добротностью резонаторов и коэффициентом связи между ними [5]. При оптимальной величине нагрузки КПД системы  $\eta$ , равный отношению мощности, выделяемой на нагрузку, к входной мощности, может быть вычислен с помощью следующего выражения:

$$\eta = \frac{1}{1 + k_{eff}^2 \cdot (1 + \sqrt{1 + k_{eff}^2})}, \quad (1)$$

$$k_{eff} = k \sqrt{Q_1 \cdot Q_2} = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \sqrt{Q_1 \cdot Q_2}. \quad (2)$$

где  $M$  – взаимная индуктивность между резонаторами,  $L_1$  и  $L_2$  – их собственные индуктивности, а  $Q_1$  и  $Q_2$  – добротности резонаторов.

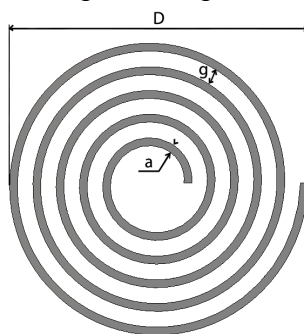


Рисунок 1

Исходя из этих соображений в качестве основной конструкции были выбраны излучатели в виде спирали (рис.1), так как они позволяют формировать магнитные поля с высокой напряженностью и имеют высокую добротность. Затем были исследованы зависимости добротности излучателей от ширины металлизации  $a$ , ширины зазора между витками  $g$  и количества витков спирали  $N$  на частотах 150 кГц и 13,56 МГц. С учётом того, что принимающий резонатор должен устанавливаться в портативное электронное устройство, он должен иметь компактные размеры. Передающий резонатор наоборот должен иметь максимально возможные размеры для обеспечения приемлемой дальности действия системы. Исходя из этих требований, нами были выбраны следующие геометрические размеры: диаметр передающего резонатора  $D_1 = 70$  мм, диаметр приемного резонатора  $D_2 = 20$  мм. Все конструкции размещались на подложке из FR4 толщиной 1 мм. Результаты электродинамического моделирования представлены на рис.2 и рис.3. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что оптимальными (с учётом технологических факторов при изготовлении) для передающего и приёмного излучателей являются параметры, представленные в таблице 1.

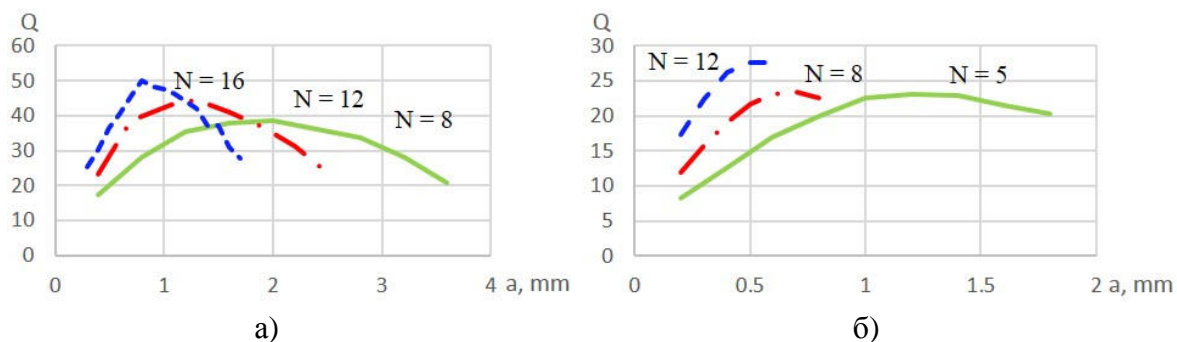


Рисунок 2. Зависимость добротностей передающего (а) и приемного (б) излучателей от геометрических параметров конструкций на частоте 150 кГц.

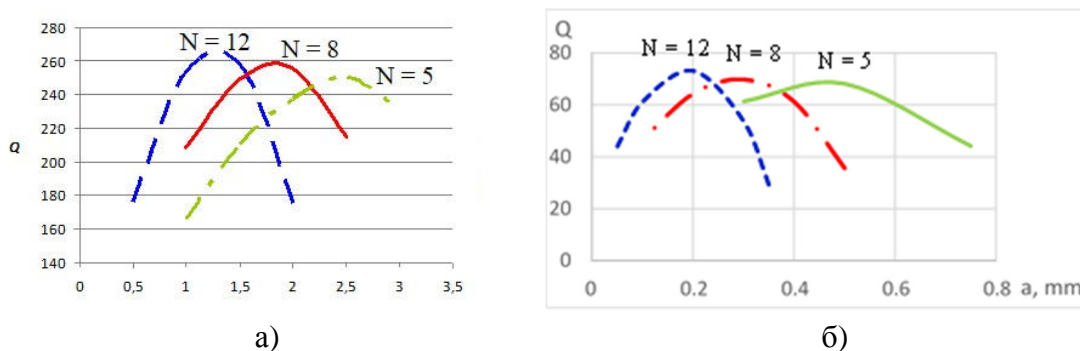


Рисунок 3. Зависимость добротностей передающего (а) и приемного (б) излучателей от геометрических параметров конструкций на частоте 13,56 МГц.

Таблица 1.

Резонатор	D, мм	Частота 150 кГц			Частота 13,56 МГц		
		N	a, мм	g, мм	N	a, мм	g, мм
Передающий	70	16	1	1	16	0,5	1,5
Приемный	20	8	0,5	0,5	5	1	1

**Согласование излучателей.** Рассмотрим излучатель с двумя портами: для подключения каналов передачи энергии и информации. Поскольку передача и энергии, и данных должна осуществляться с помощью одного излучателя, необходимо исключить взаимное влияние каналов друг на друга. В случае, когда частоты каналов отличаются друг от друга в несколько раз, резонатор может быть независимо согласован относительно обоих портов. Для этого параллельно со входом для сигнала более высокой частоты включается индуктивность  $L_0$ , а параллельно со входом для более низкой частоты – ёмкость  $C_0$  (рис.4). Сопротивления индуктивности и емкости определяются соответственно следующими выражениями:  $Z_L = j\omega L_0$ , а  $Z_C = 1/j\omega C_0$ . Таким образом, индуктивность на низкой частоте практически эквивалентна короткому замыканию, а емкость – холостому ходу. На высокой же частоте индуктивность эквивалентна холостому ходу, а емкость – короткому замыканию. Предложенная конструкция на каждой рабочей частоте эквивалентна резонатору в виде спирали, причем оба канала не влияют друг на друга, поскольку «закорочены» на рабочей частоте другого канала. Такой подход

позволяет проектировать достаточно простые согласующие цепи [6] для обоих каналов независимо друг от друга.

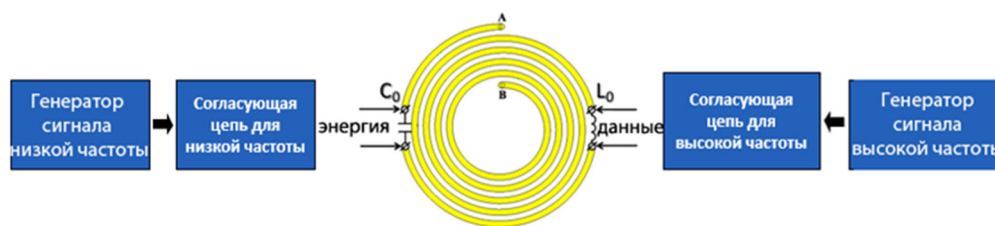


Рисунок 4

**Моделирование системы.** После выбора оптимальной конструкции резонаторов был выполнен анализ эффективности системы путем ее моделирования. Для этого, прежде всего, были промоделированы трехмерные конструкции двух резонаторов, расположенных друг от друга на требуемом расстоянии  $s$ . Затем рассчитанные S-параметры экспортировались в другой симулятор для дальнейшего схемотехнического анализа, который необходим для нахождения номиналов элементов согласующих цепей. Разделение задач трехмерного и схемотехнического моделирования позволяет значительно сократить время расчетов.

Частотные зависимости коэффициента передачи для обеих рассматриваемых систем, полученных в результате моделирования, при расстоянии между приёмной и передающей частями  $s = 15$  мм, представлены на рис. 5. Значение коэффициента передачи на рассматриваемой частоте (в относительных единицах) численно равно КПД системы.

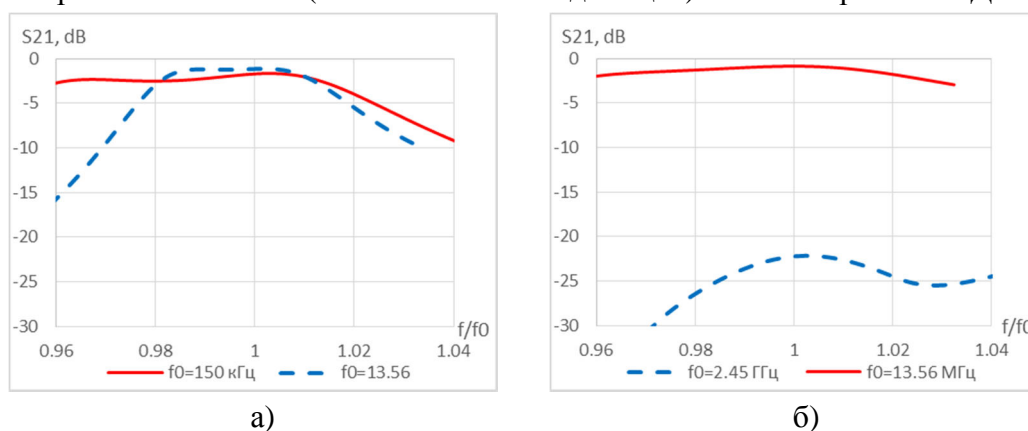


Рисунок 5. Частотные зависимости коэффициента передачи системы 1 (а) и системы 2 (б).

Анализ полученных кривых показывает, что для системы 1 КПД зарядки на частоте 150 кГц составляет 68%, а эффективность передачи информации на частоте 13,56 МГц - 77%. Что касается системы 2, эффективность зарядки на частоте 13,56 МГц также достаточно высока - 80 %, в то время как связь между резонаторами на частоте 2,4 ГГц очень слабая - всего 0,5%. Тем не менее, данного уровня достаточно для уверенного приема современными цифровыми системами с их высокой чувствительностью до -80 дБм.

Столь низкая эффективность на высокой частоте обусловлена тем, что длина волны значительно меньше длины резонатора, из-за чего напряжённость магнитного поля,

формируемая различными участками резонатора имеет различное направление, что в конечном итоге приводит к существенному ослаблению поля.

**Экспериментальное исследование системы.** Для иллюстрации применимости предложенной методологии было дополнительно проведено экспериментальное исследование системы 2.

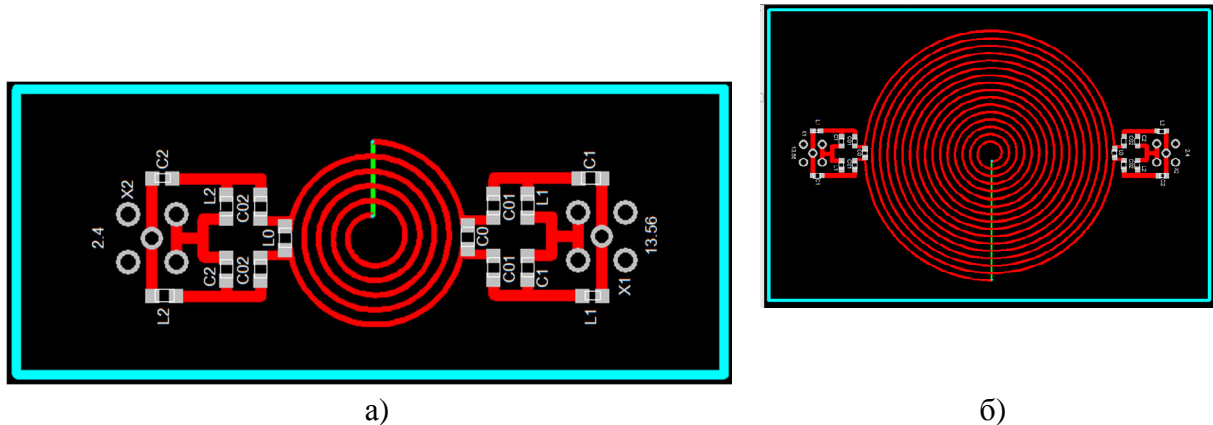


Рисунок 6. Топологии приемного (а) и передающего (а) излучателей.

Топологии приемного и передающего излучателей с цепями согласования показаны на рисунке 6 (масштабные соотношения не соблюдены). Геометрические размеры резонаторов были выбраны в соответствии с таблицей 1. Резонаторы расположены на диэлектрической подложке FR4 толщиной 1 мм. Толщина металлизации составляет 35 мкм. Все установленные в цепях согласования SMD компоненты имеют типоразмер 0603. Для связи с генератором использованы угловые SMA разъемы для монтажа на плату. Номиналы элементов цепей согласования приемного резонатора:  $L_1 = 85$  нГн,  $C_{01} = 10$  пФ,  $C_1 = 390$  пФ. Номиналы элементов цепей согласования передающего резонатора:  $L_2 = 470$  нГн,  $C_{02} = 15$  пФ,  $C_2 = 330$  пФ. При выбранных номиналах на рабочих частотах в обоих каналах приемного и передающего излучателей достигается приемлемый уровень согласования порядка -10 дБ. Результаты измерения коэффициента передачи системы представлены на рисунке 7.

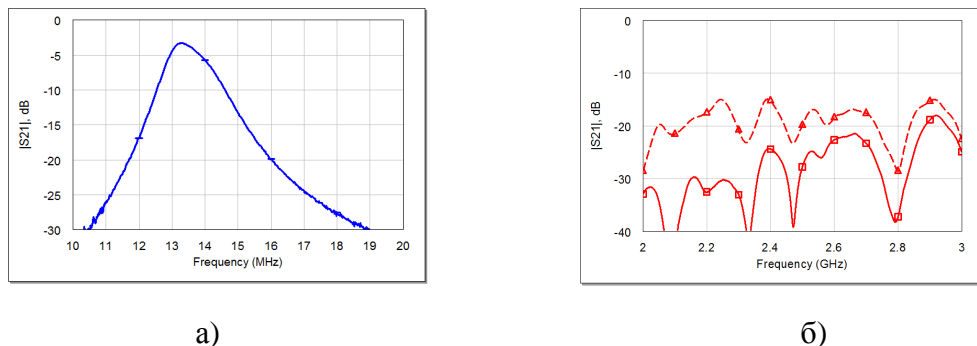


Рисунок 7. Измеренные частотные зависимости коэффициентов передачи системы из двух излучателей вблизи частот  $f_{01} = 13.56$  МГц (а) и  $f_{02} = 2.4$  ГГц (б) при расстоянии между резонаторами 1,5 см (сплошная линия) и 1 см (пунктирная линия).

Коэффициент передачи в канале передачи данных на частоте 2.4 ГГц соответствует уровню порядка -20 дБ. Измеренное значение коэффициента передачи энергии системы составило -3 дБ, что соответствует КПД, равному 50 %. Однако, по всей видимости, эффективность зарядки получилась ниже расчетной из-за худшего согласования обоих каналов. Нетрудно оценить, что при лучшем уровне согласования, позволяющего практически исключить потери на отражение, КПД может достигать 70 %

**В заключение отметим,** что в данной статье была рассмотрена двух диапазонная конструкция приемного и передающего излучателей, входящих в состав системы для одновременного осуществления бесконтактного питания и обмена данными. Предложенная конструкция позволяет исключить взаимное влияние каналов передачи энергии и информации друг на друга. Проведенный анализ системы позволяет сделать вывод о том, что для данных конструкций излучателей передача может эффективно осуществляться только на достаточно низких частотах (в килогерцовом и мегагерцовом частотных диапазонах), а использование гигагерцового диапазона требует внесения дополнительных изменений.

#### Библиографический список

1. Imagine a future in which wireless electricity makes everyday products more convenient, reliable, and environmentally friendly: <http://witricity.com>.
2. Kurs, A. Power Transfer through Strongly Coupled Resonances // M.Sc. thesis Massachusetts Institute of Technology - 2007. - P.42.
3. Rathge C. High efficient inductive energy and data transmission system with special coil geometry / C. Rathge, D. Kuschner, // Proc. of 13-th European Conference - Power Electronics and Applications - 2012 - P.1 - 8.
4. Heikkinen, J. Planar rectennas for 2.45 GHz wireless power transfer / J. Heikkinen, P. Salonen, M. Kivikoski // IEEE Radio and Wireless Conference - 2000. - P. 63-66.
5. Vendik O.G., Kozlov D.S. Wireless energy transfer systems: state of the art and efficiency improvement // Proceedings of the IEEE Russia North West Section - 2011. - V. 1. – P. 63-68.
6. AVR2004: LC-Balun for AT86RF230. Atmel Application Note. July 2004.