

Система объемных резонаторов для беспроводного питания свободно ориентированных в пространстве приемников

Вдовенко А.Н.¹

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Щелокова А.В.¹

¹Университет ИТМО

andrej.vdovenko@metalab.ifmo.ru

Работа выполнена при поддержке государственного задания № FSER-2024-0041 в рамках национального проекта «Наука и университеты».

Введение

Одним из перспективных направлений развития тематики беспроводной передачи энергии (БПЭ) в объёме является исследование систем с возможностью одновременной передачи энергии нескольким приёмным устройствам, которые могут как свободно располагаться, так и быть свободно ориентированными в пространстве внутри передающей системы [1],[2]. Одновременная передача энергии нескольким устройствам беспроводным способом может быть реализована при помощи резонаторов с равномерным распределением амплитуды магнитного поля [3],[4]. Для передачи энергии свободно ориентированным в пространстве приёмникам необходимо возбуждать магнитное поле, ортогональные компоненты которого по всем трём осям координат являются ненулевыми. Однако одновременное возбуждение трёх компонент магнитного поля не приведёт ко всенаправленной передаче энергии.

Данная работа посвящена разработке и исследованию систем БПЭ, устойчивых к произвольной ориентации приемных устройств. Ключевая научно-техническая новизна предложенного и изученного подхода заключается в создании системы из нескольких резонаторов с определенной геометрической конфигурацией, обеспечивающей формирование равномерного и высокоамплитудного распределения радиочастотного магнитного поля в заданном рабочем объёме, при минимизации электромагнитной между отдельными резонаторами.

Основная часть

Для исследования была выбрана геометрия объемного резонатора с размерами 500 мм × 500 мм × 330 мм, состоящий из двух параллельно соединённых резонансных контуров. Контур резонатора были выполнены из медного проводника диаметром 3.56 мм. В качестве рабочей частоты системы была выбрана частота 6,78 МГц, которая соответствует международному стандарту для систем БПЭ AirFuel. Для настройки на эту частоту использовались ёмкости 483 пФ.

В системе из двух объёмных резонаторов развязки по электрическому и магнитному полям можно достичь путем ориентации второго резонатора таким образом, чтобы направление вектора магнитной индукции было повернуто на 90 градусов относительно первого резонатора, а плоскости симметрии электрических полей были взаимно ортогональны. При такой конфигурации поля резонаторов становятся взаимно ортогональными, что минимизирует связь между ними.

Для оценки эффективности системы было проведено численное моделирование системы из двух резонаторов в CST Microwave Studio. Был рассмотрен режим попеременного возбуждения, при котором в каждый момент времени активен только один резонатор: сигнал подается на первый, а второй отключен, затем, происходит переключение, где второй резонатор возбуждается, а первый – нет. Моделирование выполнялось с учетом присутствия в рабочей области приемной катушки, настроенной на рабочую частоту и нагруженной на собственный импеданс.

Результаты моделирования показали, что наличие паразитной связи между резонаторами через приемную катушку негативно отражается на работе системы. В этих условиях эффективность системы, которая определяется как отношение мощности, потребляемой нагрузкой в приемнике, к мощности, подводимой к передающему резонатору, составила всего 2%. Это указывает на дестабилизацию режима работы из-за нежелательного взаимодействия контуров через приёмную катушку.

Для повышения эффективности системы необходимо минимизировать паразитную связь между резонаторами. Поскольку в рассматриваемом режиме сигнал подается только на один резонатор в каждый момент времени, второй резонатор можно отстроить от рабочей частоты на период возбуждения первого. Данный подход был проверен с помощью численного моделирования. Результаты моделирования показали, что при таком управлении эффективность системы БПЭ в целом возрастает до 58% и схема отстройки вносит пренебрежимо малые диссипативные потери, не снижающие общую эффективность системы. Несмотря на это, была выполнена дополнительная проверка достаточности степени отстройки резонатора, поскольку в реальных условиях часть емкости резонансного контура не замыкается переключателем с нулевым сопротивлением, потому что диодный мост и транзистор имеют некоторое конечное сопротивление, которое позволит току частично протекать по замыкаемой ёмкости.

Для оценки достаточности отстройки резонатора от исходной рабочей частоты, полученные данные о потерях в активных и пассивных компонентах схемы были интегрированы в полную электродинамическую модель системы, реализованную в CST Microwave Studio. При учете всех потерь, включая потери в схеме управления, эффективность системы БПЭ составила около 56%, что лишь незначительно ниже значения для идеализированной модели (58%) без учета сопротивления компонентов. Это подтверждает работоспособность и эффективность предложенного решения.

Выводы

В работе показано, что для системы с двумя резонаторами выгоднее использовать питание с одновременной подачей сигналов на оба резонатора. Однако, при необходимости обеспечения всенаправленной передачи энергии (то есть для системы нечувствительной к повороту приемника относительно трех плоскостей), одновременное питание трех резонаторов не продемонстрирует того же эффекта, как с двумя. Поэтому исследования, связанные с попеременным питанием резонаторов, имеют ценность в будущей реализации системы из трех резонаторов.

Литература

1. Mingzhao Song, Esmaeel Zanganeh, Mariia Krasikova, Pavel Smirnov, Pavel Belov, Polina Kapitanova & Constantin Simovski Wireless power transfer based on novel physical concepts // Nature Electronics 2021, p.707–716 URL: <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00658-x> (Дата обращения 19.02.2026).
2. Kerui Li, Jiayang Wu, Yun Yang, Shu Yuen Ron Hui Analysis of Near-Field Magnetic Flux in the Three-Dimensional Wireless Power Transmitter // WPTCE 2024 URL: <https://doi.org/10.1109/WPTCE59894.2024.10557274> (Дата обращения 19.02.2026).
3. Aigerim Jandaliyeva, Andrey Vdovenko, Mikhail Siganov, Leila Suleiman, Pavel Seregin, Mikhail Udrov Design and demonstration of the volumetric resonator with uniform magnetic field distribution for wireless power transfer // WPTCE 2024 URL: <https://doi.org/10.1109/WPTCE59894.2024.10557310> (Дата обращения 19.02.2026).
4. Aigerim Jandaliyeva, Nikita Mikhailov, Andrey Vdovenko, Mikhail Siganov, Evgenii Maiorov, Pavel Seregin Room-Sized Helmholtz-Type Resonator for Ubiquitous Wireless Power Transfer // WPTCE 2024 URL: <https://doi.org/10.1109/WPTCE59894.2024.10557386> (Дата обращения 19.02.2026).

Автор
Вдовенко А.Н

Научный руководитель
Щелокова А.В.