DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.10.2

УДК: 621.37

Объемный резонатор для беспроводной передачи энергии в частотном диапазоне стандарта Qi

А. Джандалиева, А.Н. Вдовенко, Н.В. Михайлов, П.А. Белов, А.В. Щелокова

Университет ИТМО,
Россия, Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 14 октября 2026 г.

Аннотация. Предложена и исследована передающая структура размером 0,5×0,5×0,35 м^3 для беспроводного питания портативных устройств, работающая на частоте 100 кГц, входящей в рабочий диапазон стандарта Qi. Передающая структура представляет собой объемный резонатор с конфигурацией на основе колец Гельмгольца и формирует в рабочем объеме близкое к равномерному распределение амплитуды магнитного поля. Характеристики системы исследованы с помощью численного электромагнитного моделирования и подтверждены экспериментально. Численное моделирование показало, что равномерность амплитуды магнитного поля в рабочем объеме 0,35×0,35×0,25 м^3 составляет около 89%, что обеспечивает слабую зависимость коэффициента полезного действия от положения приемника. Экспериментально полученный коэффициент полезного действия находится в диапазоне 20–25% во всем рабочем объеме. Работоспособность системы продемонстрирована на примере беспроводной зарядки смартфона, сохраняющейся при его перемещении внутри рабочей области резонатора без перенастройки согласующих цепей. Электромагнитная безопасность системы оценена численно с использованием анатомической модели руки человека. При передаче мощности 5 Вт пиковое

значение индуцированного в тканях электрического поля составило 2,39 В/м, а пиковое значение удельного коэффициента поглощения, усредненного по 10 г ткани, составило 88 нВт/кг. Оба значения существенно ниже предельных уровней 13,5 В/м и 4 Вт/кг соответственно, установленных международными нормами безопасности для частоты 100 кГц. Полученные результаты показывают возможность использования предложенной структуры для создания систем беспроводного питания портативных устройств в объеме без необходимости их точного позиционирования в рабочей области.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, объемные резонаторы, кольца Гельмгольца, ближнее электромагнитное поле, коэффициент полезного действия, электромагнитная безопасность, стандарт Qi.

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

Автор для переписки: Джандалиева Айгерим, a.jandaliyeva@metalab.ifmo.ru

Введение

Беспроводная зарядка широко применяется для питания портативных электронных устройств. Одним из наиболее распространенных решений является стандарт Qi, рабочий частотный диапазон которого составляет 87–205 кГц [1]. Передача энергии в таких системах основана на индуктивной связи между передающей и приемной катушками, расположенными на небольшом расстоянии друг от друга [2]. Такой принцип требует достаточно точного взаимного позиционирования катушек и существенно ограничивает возможность перемещения устройства во время зарядки, а также одновременного питания нескольких приемников от одной передающей структуры.

Одним из подходов к преодолению указанных ограничений является переход к системам беспроводной передачи энергии (БПЭ) в объеме, в которых передающая структура формирует электромагнитное поле в некоторой области пространства, обеспечивая передачу энергии приемникам, расположенным в

различных точках рабочего объема. Такие системы востребованы для питания носимой электроники [3, 4], устройств Интернета вещей [5, 6], систем мониторинга лабораторных животных [7, 8], радиочастотных катушек для магнитно-резонансной томографии [9–11], а также для питания устройств контроля состояния грузов [12, 13] и мониторинга авиационной техники [14, 15].

Существующие подходы к реализации БПЭ в объеме могут быть разделены на системы, использующие направленную передачу энергии в дальней зоне, и ближнепольные системы. К первой группе относятся оптические системы БПЭ с использованием направленного лазерного излучения [16, 17] и радиочастотные системы на основе фазированных антенных решеток [18, 19]. Применение лазерных систем требует прямой видимости между передатчиком и приемником, тогда как возможности радиочастотных систем, работающих, например, на частотах 915 МГц и 5,8 ГГц, ограничены требованиями электромагнитной безопасности [20]. Вследствие этого такие решения применяются преимущественно для питания маломощных устройств и датчиков [6, 21, 22] и имеют ограничения при передаче энергии порядка единиц и десятков ватт в присутствии человека.

Альтернативным подходом является БПЭ за счет индуктивной связи между передающей и приемной катушками резонансной структуры. Так, в работе [8] предложена компактная система для беспроводного питания устройств, используемых для мониторинга лабораторных животных, однако передаваемая мощность порядка 100 мВт ограничивает возможность ее применения для питания портативной электроники. В работах [3, 4] продемонстрированы квазистатические объемные резонаторы масштаба помещения, способные передавать энергию порядка единиц ватт. Однако распределение магнитного поля в их рабочем объеме существенно неоднородно, вследствие чего передача энергии зависит от местоположения приемника.

Отдельным ограничением существующих систем БПЭ в объеме является их рабочая частота. Значительная часть предложенных ранее объемных резонаторов работает в мегагерцевом диапазоне, тогда как приемные системы,

используемые в портативной потребительской электронике, рассчитаны на существенно более низкие частоты. Для реализации БПЭ в объеме в частотном диапазоне стандарта Qi требуется адаптация передающего резонатора к частотам порядка 100 кГц. Такое снижение рабочей частоты требует перерасчета параметров резонансной и согласующей цепей. Изменяется добротность контура и соотношение потерь в системе, что предъявляет новые требования к конструкции проводников и емкостных элементов. Такое снижение рабочей частоты требует перерасчета параметров резонансной и согласующей цепей и предъявляет иные требования к конструкции проводников и емкостных элементов вследствие изменения добротности и соотношения потерь в системе. Целью настоящей работы является разработка и экспериментальное исследование объемного резонатора с конфигурацией на основе колец Гельмгольца, работающего на частоте 100 кГц, входящей в диапазон стандарта Qi, и предназначенного для беспроводного питания портативных устройств в объеме. В работе исследуются распределение магнитного поля и зависимость коэффициента полезного действия (КПД) от положения приемника, а также проводится оценка электромагнитной безопасности предложенной системы.

1. Численное электромагнитное моделирование

Численное электромагнитное моделирование проводилось в программном пакете CST Microwave Studio методом конечных элементов в частотной области. За основу была взята конфигурация объемного резонатора на основе колец Гельмгольца. Данная конфигурация была ранее исследована в работе [23], где сравнительный анализ различных топологий показал, что она обеспечивает наибольший КПД и максимальное значение критерия качества связи при сопоставимой равномерности распределения магнитного поля. В настоящей работе эта структура была модифицирована для работы на частоте 100 кГц.

Модель выбранной топологии объемного резонатора представлена на рис. 1(а). Она состояла из двух медных колец прямоугольного поперечного сечения 20×3 мм^2 с внешним размером 0,5×0,5 м^2. Расстояние между кольцами

составляло 0,35 м. Кольца были электрически соединены вертикальными медными проводниками.

Системы БПЭ в объеме могут использоваться для одновременной передачи энергии к нескольким приемникам. Однако для реализации этого режима требуется, чтобы ток в проводниках передающего резонатора не зависел от количества и положения питаемых приемников [24]. Одним из способов стабилизации рабочего тока является применение схемы согласования LCC [25]. Эта схема содержит три реактивных элемента: индуктивность, подключаемую последовательно между источником и остальной частью схемы; параллельный конденсатор, подключаемый за ней; и конденсатор, подключаемый последовательно с индуктивностью, образованной передающей катушкой. Значения емкостей последовательного и параллельного конденсаторов выбираются из условия резонанса контура, образованного индуктивностью кольца и емкостью этих конденсаторов, на рабочей частоте системы. Соотношение между значениями емкостей определяется требованиями ко входному импедансу системы. Индуктивность, подключенная последовательно с источником, выбирается такой, чтобы модуль ее реактивного сопротивления совпадал с модулем сопротивления параллельного конденсатора. При высокой добротности резонансного контура и в отсутствие приемников индуктивность вносит пренебрежимо малый вклад во входной импеданс системы. При подключении приемников добротность системы снижается, что приводит к сдвигу эффективной резонансной частоты контура и появлению реактивности на рабочей частоте; выбранная таким образом индуктивность компенсирует реактивность в первом приближении [25].

В исследуемом резонаторе рабочая мода возбуждается при протекании равных и синфазных токов в двух кольцах. Для ее возбуждения последовательный и параллельный конденсаторы одинаковой емкости были установлены отдельно для каждого из колец. В результате амплитуда тока в кольцах и амплитуда магнитного поля в резонаторе оставались стабильными,

а рабочая точка системы не смещалась относительно резонансной частоты при перемещении приемника внутри рабочего объема.

Распределение амплитуд электрического и магнитного полей на резонансной частоте 100 кГц представлено на рис. 1(б, в). Максимальные значения амплитуды электрического поля локализованы вблизи емкостных элементов резонансного контура (рис. 1(б)), что обусловлено запасанием электрической энергии в этих элементах. Магнитное поле в рабочем объеме ориентировано преимущественно вдоль вертикальной оси резонатора: синфазные токи в двух кольцах создают, согласно закону Био-Савара-Лапласа, аксиальные магнитные поля, которые складываются вдоль оси (рис. 1(в)). Амплитуда магнитного поля максимальна вблизи проводников и плавно уменьшается по направлению к центру, сохраняя высокую равномерность в пределах рабочего объема 0,35×0,35×0,25 м^3.

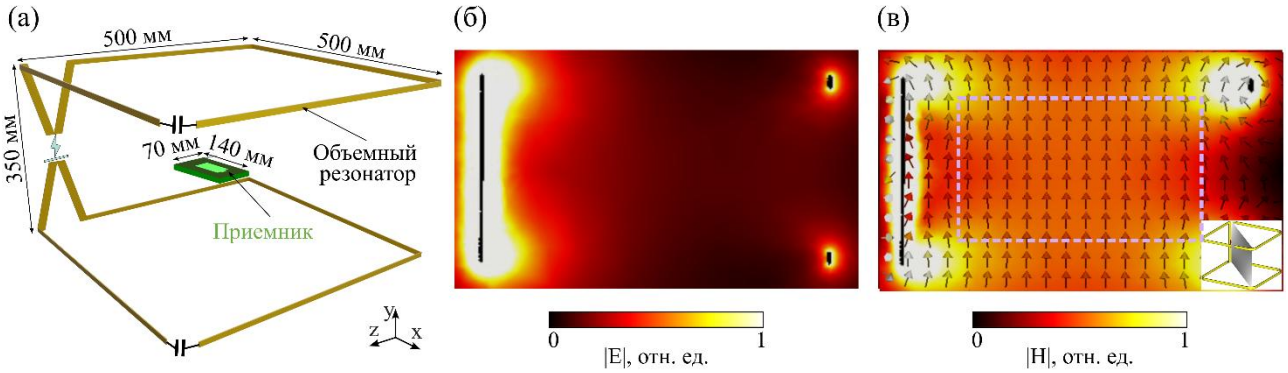


Рис. 1. Модель системы БПЭ и численно рассчитанные распределения электромагнитных полей на резонансной частоте 100 кГц: (а) геометрия объемного резонатора и приемник, расположенной в центре рабочего объема, с указанием основных размеров; (б) распределение амплитуды электрического поля в диагональном сечении; (в) распределение амплитуды магнитного поля в том же сечении. Штриховой линией обозначен рабочий объем 0,35×0,35×0,25 м^3. Вставка в нижнем правом углу на панели (в) обозначает плоскость сечения, в которой приведены распределения полей. Стрелками указано направление магнитного поля.

Равномерность распределения амплитуды магнитного поля оценивалась в рабочем объеме 0,35×0,35×0,25 м^3 по выражению:

$$\text{Равномерность}\left(|H|\right)=\left(1-\frac{\text{СКО}\left(|H|\right)}{\langle|H|\rangle}\right)\times 100\ \%,$$

где СКО($|H|$) – среднеквадратичное отклонение амплитуды магнитного поля, $\langle|H|\rangle$ – ее среднее арифметическое значение, вычисленные по всем узлам сетки внутри рабочего объема. Для исследуемой конфигурации равномерность составляет около 89 %, что свидетельствует о слабом изменении амплитуды магнитного поля в пределах рабочей области.

Приемник энергии состоял из трех элементов: плоской спиральной катушки из 10 витков медного провода диаметром 1,25 мм, ферритовой подложки с относительной магнитной проницаемостью μ_r = 220+i0,01 на 1 МГц и прямоугольного алюминиевого корпуса смартфона размером 140×70×2 мм^3 с проводимостью 3,56×10^7 См/м. Алюминиевый корпус в модели воспроизводит электромагнитное окружение приемной катушки в условиях реальной эксплуатации, когда она размещается на тыльной поверхности смартфона: металлический корпус устройства экранирует часть магнитного потока и перераспределяет его. Учет этого фактора в численной модели обеспечивает соответствие расчетных значений КПД условиям последующего экспериментального исследования. Ферритовая подложка располагалась между катушкой и корпусом для уменьшения экранирующего влияния проводящего корпуса и концентрации магнитного потока в области катушки. К приемной катушке через согласующую цепь подключалась резистивная нагрузка сопротивлением 6 Ом.

Для согласования приемной катушки с нагрузкой использовалась двухэлементная цепь из двух конденсаторов. Последовательно включенный конденсатор емкостью 41,65 нФ настраивал катушку на резонансную частоту 100 кГц, параллельно включенный конденсатор емкостью 81,4 нФ трансформировал импеданс приемной катушки к значению сопротивления нагрузки 6 Ом, обеспечивая условие максимальной передачи мощности.

Для оценки зависимости КПД от положения приемника его последовательно перемещался относительно центра резонатора с шагом 70 мм в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В каждом положении КПД определялся как отношение мощности, выделяемой на нагрузке 6 Ом в приемной

цепи, к мощности, подводимой к входу передающего резонатора. Полученные распределения КПД представлены на рис. 2.

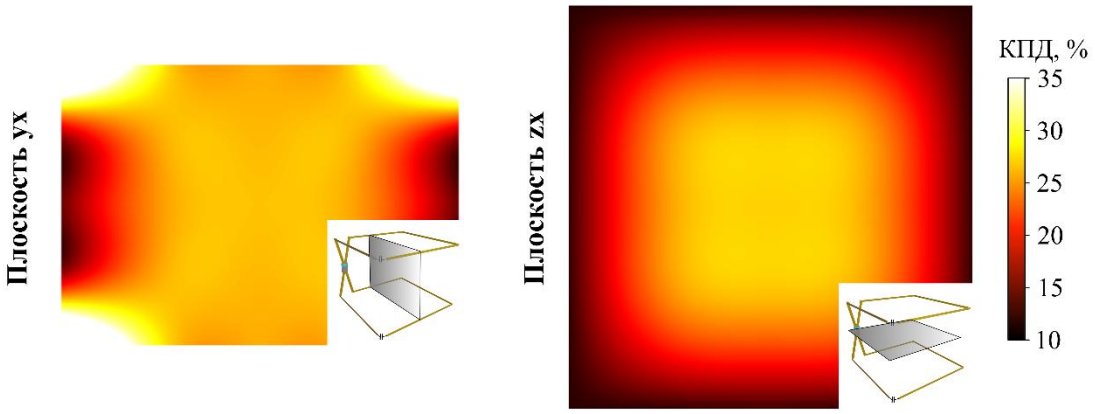


Рис. 2. Карты распределения КПД в вертикальной (слева) и горизонтальной (справа) плоскостях, рассчитанные в численном моделировании. Вставки в нижнем правом углу каждой панели показывают ориентацию плоскости сечения относительно резонатора.

В рабочем объеме 0,35×0,35×0,25 м^3 рассчитанный КПД изменяется в диапазоне 23–30 %, при этом характер его пространственного распределения соответствует распределению амплитуды магнитного поля. Переход к частоте 100 кГц позволил реализовать систему в диапазоне стандарта Qi, однако сопровождался снижением добротности резонансной системы и увеличением относительного вклада потерь. Дальнейшее повышение эффективности может быть связано с оптимизацией проводников и емкостных элементов резонатора.

Как было отмечено выше, важным функциональным свойством предложенной топологии объемного резонатора является способность передавать энергию нескольким приемникам, одновременно находящимся в рабочем объеме. Для оценки этого режима была проведена дополнительная серия расчетов с пятью идентичными приемниками, один из которых был расположен в центре резонатора, а четыре – симметрично вокруг него. При питании одного приемника, расположенного в центре, КПД составил 26,5 %. При одновременной работе всех пяти приемников суммарный КПД достигает 54,4 %. Увеличение суммарного КПД в режиме питания множества устройств более чем в 2 раза относительно питания одного приемника, объясняется тем, что при наличии нескольких приемников большая доля

мощности, запасенной в резонаторе, идет в полезную нагрузку, а не рассеивается в собственных омических потерях передающей структуры. При этом предельная эффективность ограничивается собственной эффективностью приемников, определяемой как отношение мощности на нагрузке ко всей мощности, поступающей в приемник [24]. Одновременно с увеличением эффективности, мощность, на нагрузке каждого из приемников отличается не более чем на 5 % от среднего значения и от мощности на нагрузке в модели с одним приемником, что подтверждает корректность применения выбранной схемы согласования.

2. Экспериментальное исследование

Экспериментальный образец передающего резонатора (рис. 3) был собран в соответствии с параметрами численной модели. Резонансные контуры были изготовлены из медной ленты шириной 20 мм и соединены между собой медными проводниками прямоугольного сечения 20×3 мм^2, обеспечивающими равномерное распределение амплитуды тока по всей структуре. Внешние размеры контуров составили 0,5×0,5 м^2, а расстояние между ними – 0,35 м. Механическая фиксация элементов конструкции обеспечивалась пластиковыми держателями (рис. 3(а)), изготовленными методом трехмерной печати с помощью принтера FlyingBear Reborn 2.

Схема возбуждения экспериментального образца повторяет топологию, использованную в численном моделировании (рис. 3(б)). В одном из углов каждого кольца были подключены печатные платы из материала FSD883T с медным покрытием, на которые были напаяны конденсаторы суммарной емкостью 3,4 мкФ, подключенные последовательно к кольцам. Верхний и нижний контуры были соединены вертикальными проводниками, между ними были подключены конденсаторы суммарной емкостью 8,6 мкФ. Последовательно с источником сигнала подключались два дросселя индуктивностью 330 нФ каждый.

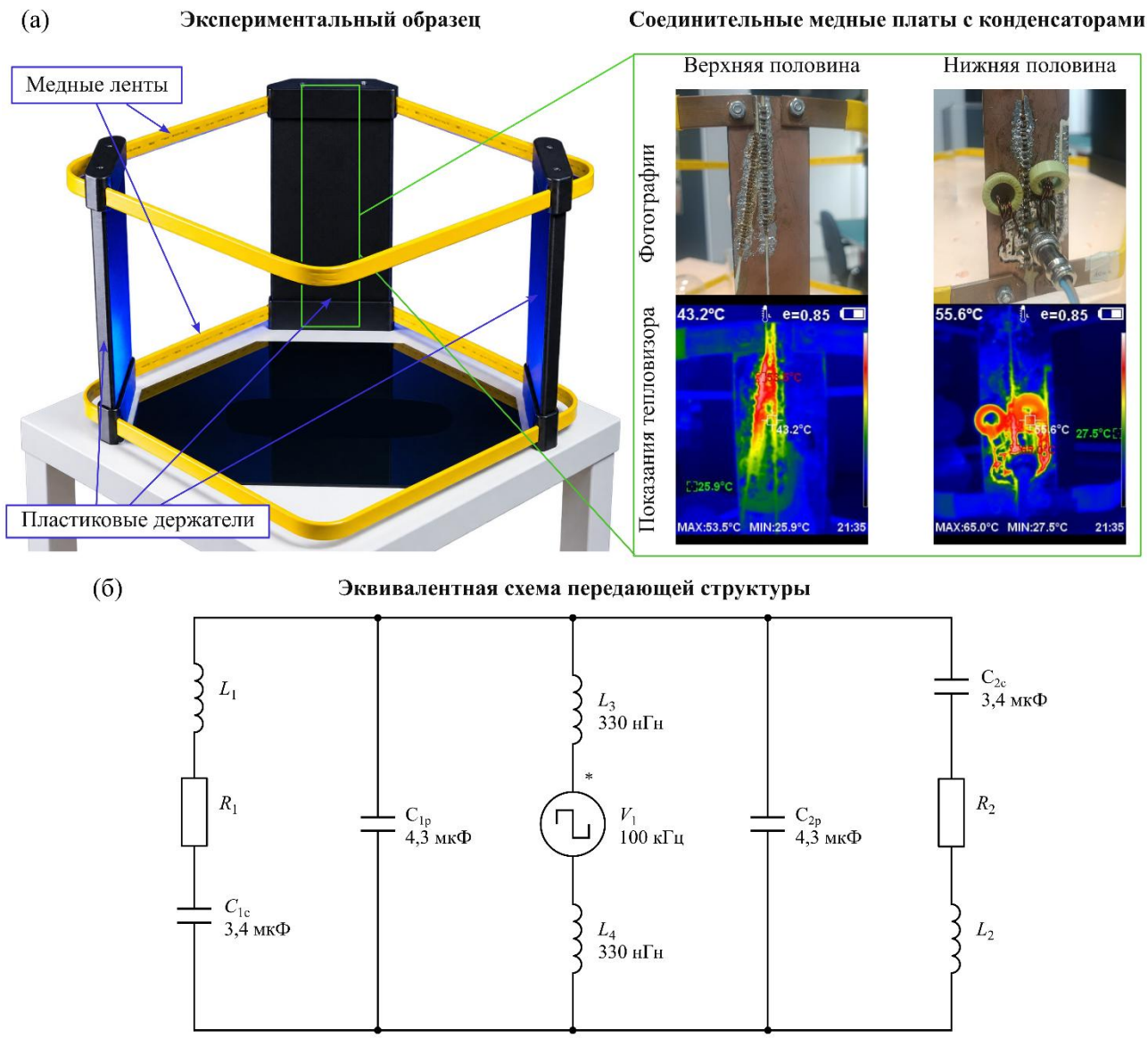


Рис. 3. Экспериментальный образец объемного резонатора: (а) общий вид экспериментального образца; вставкой обозначены соединительные медные платы с конденсаторами, размещенные внутри одного из пластиковых держателей, и термограмма образца, демонстрирующая нагрев этих элементов в режиме работы; (б) эквивалентная электрическая схема передающего резонатора.

Все конденсаторы, используемые в конструкции экспериментального образца, относятся к типу C0G серия TDK C3216C0G2A104J160AC и характеризуются низкими диэлектрическими потерями и высокой стабильностью емкости при нагреве конденсаторов. Резонансные свойства системы позволяют использовать в качестве источника полномостовой инвертор, так как высшие гармоники прямоугольного сигнала фильтруются и ток в кольцах остается гармоническим.

Приемник энергии в эксперименте состоял из тех же элементов. Плоская спиральная катушка была изготовлена из 10 витков медного провода диаметром 1,25 мм с габаритами 140×70 мм^2. Смартфон использовался как элемент электромагнитного окружения приемной катушки, частично ослабляя поле резонатора вблизи приемной катушки за счет металлических элементов в его конструкции; в качестве нагрузки к приемной катушке подключался резистор сопротивлением 6 Ом. Со стороны смартфона к катушке прилегала ферритовая подложка, уменьшающая экранирующее влияние металлического корпуса устройства и концентрирующая магнитный поток в области катушки. Такая постановка полностью соответствует условиям численного моделирования и позволяет непосредственно сопоставлять расчетные и экспериментальные значения КПД.

Настройка приемной цепи на частоту 100 кГц и ее согласование с передающей системой при подключенной нагрузке 6 Ом обеспечивались двухэлементной цепью из последовательно и параллельно подключенных конденсаторов. Номиналы конденсаторов подбирались по результатам измерений с использованием векторного анализатора цепей Планар S5085 для положения приемника в центре резонатора и оставались неизменными при его последующем перемещении в пределах рабочего объема.

Для оценки КПД измерялись мощность на входе передающего резонатора и мощность, выделяемая на резистивной нагрузке в приемной цепи. Входная мощность определялась по действующим значениям напряжения и тока с учетом фазового сдвига между ними, выходная – по действующему значению напряжения на резистивной нагрузке. При расположении приемника в центре резонатора экспериментально измеренный КПД составил 23 % (рис. 4). В пределах рабочего объема 0,35×0,35×0,25 м^3 его значения изменялись в диапазоне 20–25 %. Равномерное распределение значений КПД наблюдается в центральной области резонатора, при этом значения плавно уменьшаются по направлению к границам рабочего объема. Характер полученного распределения КПД качественно соответствует характеру распределения амплитуды

магнитного поля в резонаторе. При напряжении питания усилителя мощности 12 В и потребляемом токе 1,81 А (суммарная потребляемая мощность 21,8 Вт) мощность, выделяемая на нагрузке приемной части, составила 5 Вт, что соответствует работоспособности системы в режиме питания смартфона.

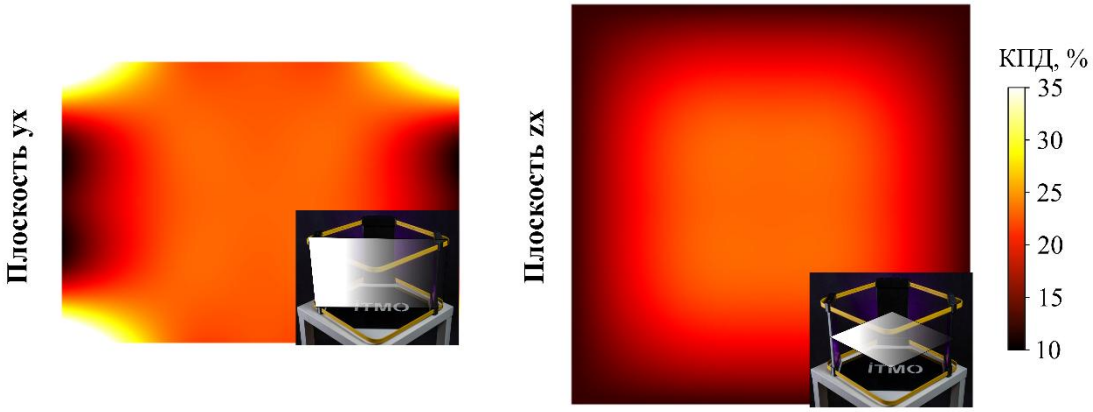


Рис. 4. Экспериментально измеренные распределения КПД в вертикальной (слева) и горизонтальной (справа) плоскостях. Вставки в нижнем правом углу каждой панели показывают ориентацию плоскости сечения относительно резонатора.

Экспериментальные значения КПД отличаются от расчетных примерно на 3,5 % при положении приемника центре резонатора, в то время как значения КПД в рабочем объеме изменялись в диапазоне 20–25 %, в моделировании 23–30 %. Основной причиной данного расхождения являются дополнительные потери в элементах экспериментального образца, не полностью учитываемые в численной модели. В частности, в моделировании в качестве соединительных элементов между кольцами использовались те же проводники прямоугольного сечения, что и для самих колец, а конденсаторы подключались как одиночные сосредоточенные элементы, тогда как в экспериментальном образце конденсаторы устанавливались на печатных платах, вносящих дополнительное активное сопротивление и представляли из себя параллельное соединение множества отдельных конденсаторов, так как выбранные конденсаторы высокой добротности имеют сравнительно низкую объемную удельную емкость и не позволяют получить требуемую емкость в одном элементе. При больших амплитудах циркулирующих токов это приводит к дополнительным омическим потерям и нагреву проводящих элементов. Распределение температуры на

поверхности экспериментального образца, полученное с помощью тепловизора (рис. 3(а)) подтверждает локализацию потерь в конденсаторах и дросселях. Повышение КПД системы в последующих реализациях экспериментального образца возможно за счет использования печатных плат с увеличенной толщиной медного покрытия или распределения конденсаторов по обеим сторонам платы для увеличения эффективной площади проводников.

Работоспособность системы при питании реальной нагрузки была продемонстрирована на примере смартфона (рис. 5(а)). В данном случае резистивная нагрузка 6 Ом заменялась самим смартфоном: приемная катушка через выпрямитель и стабилизатор напряжения подключалась к разъему зарядки смартфона через провод, который обеспечивал подачу постоянного напряжения 5 В. При его перемещении в пределах рабочего объема процесс зарядки сохранялся без перенастройки согласующих цепей.

Данный результат указывает на целесообразность применения предложенной структуры в сценариях одновременной зарядки нескольких устройств. Геометрия передающей структуры допускает ее интеграцию в элементы окружающей среды; один из возможных вариантов встраивания системы в предмет мебели представлен на рис. 5(б).

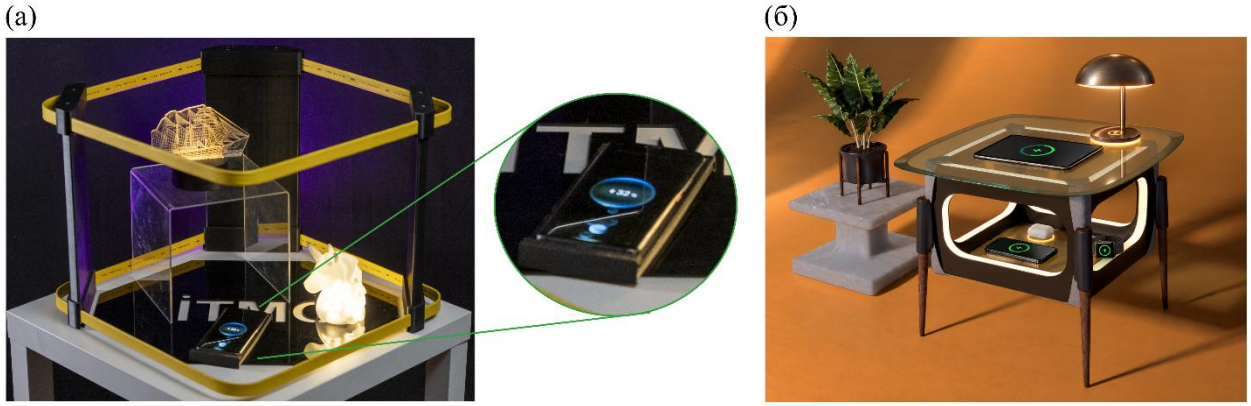


Рис. 5. (а) демонстрация беспроводного питания трех устройств (смартфона и двух светильников) в эксперименте; (б) пример реализации встроенной в мебель системы БПЭ.

3. Электромагнитная безопасность

Оценка электромагнитной безопасности является одним из ключевых этапов при разработке систем БПЭ, предназначенных для эксплуатации в присутствии человека. Рекомендации Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений (ICNIRP) [25, 26] устанавливают ограничения на воздействие электромагнитных полей с учетом тепловых и нетепловых эффектов. Тепловое воздействие связано с поглощением электромагнитной энергии биологическими тканями и характеризуется удельным коэффициентом поглощения (УКП). Нетепловые эффекты на рассматриваемых частотах связаны преимущественно с электрическим полем, индуцируемым в тканях и способным вызывать стимуляцию нервной и мышечной систем. Для рабочей частоты 100 кГц определяющим ограничением является величина индуцированного электрического поля.

Оценка параметров электромагнитного воздействия проводилась методом численного моделирования в соответствии с подходом, предусмотренным стандартом IEC/IEEE 63184:2025 [28]. Моделирование выполнялось в программном пакете CST Microwave Studio с использованием многотканевой анатомической модели руки человека из библиотеки CST Bio Library, учитывающей диэлектрические свойства кожи, мышечной, жировой и костной тканей на рабочей частоте 100 кГц. Анатомическая модель располагалась в центре резонатора в положении, соответствующем сценарию, при котором пользователь удерживает смартфон внутри рабочего объема (рис. 6(а)). Мощность источника задавалась таким образом, чтобы на нагрузке приемной катушки, расположенной в центре резонатора, выделялась мощность 5 Вт.

Пиковое значение УКП, усредненное по 10 г ткани, составило 88 нВт/кг (рис. 6(б)), что значительно ниже установленного ICNIRP предела для населения 4 Вт/кг. Пиковое значение индуцированного электрического поля составило 2,39 В/м (рис. 6(в)), что приблизительно в 5,6 раза ниже допустимого уровня 13,5 В/м на частоте 100 кГц. Таким образом, при передаче мощности 5 Вт

исследуемая система удовлетворяет установленным ограничениям как по УКП, так и по индуцированному электрическому полю.

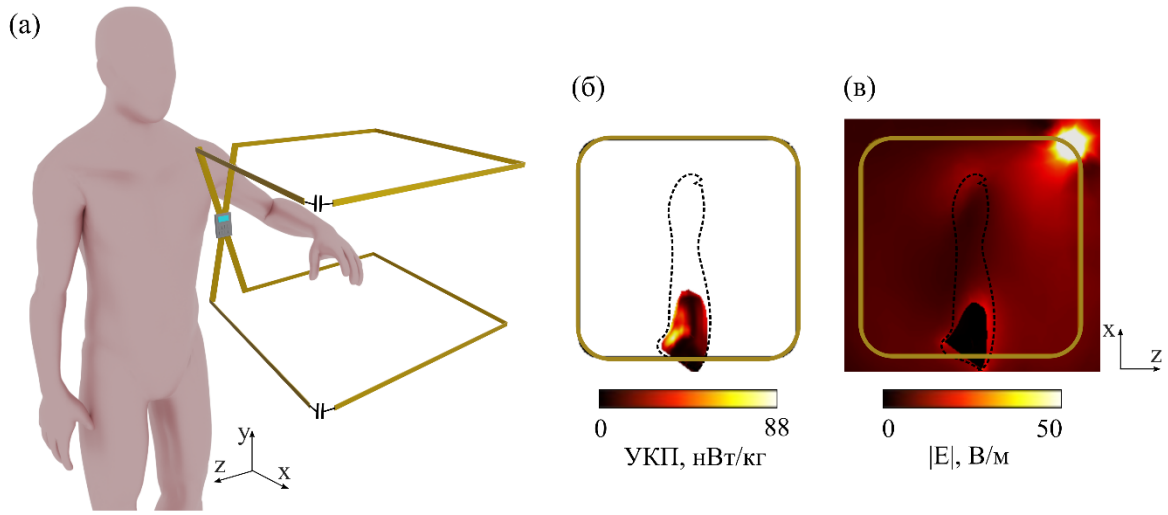


Рис. 6. Результаты численной оценки электромагнитной безопасности системы на частоте 100 кГц: (а) положение анатомической модели руки человека относительно резонатора; (б) распределение УКП, усредненного по 10 г ткани; (в) распределение амплитуды электрического поля в объеме резонатора.

Полученный запас по индуцированному электрическому полю указывает на возможность увеличения передаваемой мощности до достижения нормативного ограничения. В линейном режиме амплитуда индуцированного электрического поля пропорциональна амплитуде возбуждения и, следовательно, квадратному корню из мощности. Поэтому отношение предельного значения поля к рассчитанному соответствует потенциальному увеличению мощности примерно в 32 раза при условии сохранения распределения поля и линейности системы.

Низкий уровень электромагнитного воздействия связан с особенностями распределения полей в резонаторе. Как показано в разделе численного электромагнитного моделирования, максимумы электрического поля локализованы преимущественно вблизи емкостных элементов, тогда как рабочая область располагается в зоне относительно низкой амплитуды электрического поля. Кроме того, при заданной амплитуде магнитного поля величина электрического поля, индуцируемого в проводящих тканях переменным магнитным потоком, уменьшается с понижением рабочей частоты. Это является

дополнительным фактором снижения электромагнитного воздействия при работе системы на частоте 100 кГц.

Полученные результаты показывают, что при передаче мощности 5 Вт предложенная система соответствует ограничениям ICNIRP с существенным запасом по рассматриваемым показателям электромагнитного воздействия.

Заключение

В работе предложена и экспериментально исследована передающая структура для беспроводного питания портативных устройств в объеме, работающая на частоте 100 кГц, которая входит в частотный диапазон международного стандарта Qi. Передающая структура выполнена в виде объемного резонатора на основе конфигурации колец Гельмгольца. Главной особенностью предложенной топологии является высокая равномерность распределения амплитуды магнитного поля внутри объема резонатора. Численное моделирование показало, что равномерность распределения амплитуды магнитного поля в рабочем объеме 0,35×0,35×0,25 м^3 составляет около 89 %. Электрическое поле при этом сосредоточено вблизи конденсаторов, вне рабочего объема, что способствует безопасной эксплуатации системы в присутствии человека. Благодаря высокой равномерности распределения амплитуды магнитного поля КПД системы БПЭ слабо зависит от положения приемника, и в эксперименте находится в диапазоне от 20 до 25 %. Слабая зависимость КПД от положения приемника отличает предложенную систему от традиционных индуктивных зарядных устройств стандарта Qi, для которых эффективность передачи существенно зависит от взаимного расположения передающей и приемной катушек. Работоспособность системы продемонстрирована на примере беспроводного питания смартфона. При перемещении приемника в пределах рабочего объема процесс зарядки сохранялся без необходимости перенастройки согласующих цепей.

Кроме того, с помощью методов численного моделирования был продемонстрирован режим питания множества устройств, где при

одновременном размещении пяти приемников одинакового размера в рабочем объеме суммарный КПД системы составила 54,4 %, что более чем вдвое превышает значение, полученное при питании одного приемника 26,5 %, при этом мощность на нагрузке каждого из приемников в обоих сценариях совпадает с точностью до 5 %. Это свойство делает предложенную структуру особенно эффективной в сценарии одновременной зарядки множества устройств.

Численная оценка электромагнитной безопасности с анатомической моделью руки человека показала, что пиковое значение индуцированного в тканях электрического поля в 5,6 раза ниже предельного уровня, установленного рекомендациями ICNIRP для частоты 100 кГц. Таким образом, исследуемая система соответствует нормативным ограничениям с существенным запасом по рассматриваемым показателям электромагнитного воздействия.

Конструкция передающей структуры допускает ее интеграцию в элементы окружающей среды и формирование локальных зон беспроводного питания портативных устройств без необходимости их точного позиционирования относительно передатчика. Полученные результаты подтверждают применимость принципа объемной беспроводной передачи энергии в частотном диапазоне стандарта Qi и могут рассматриваться как основа для дальнейшего масштабирования подобных систем и создания распределенной инфраструктуры беспроводного питания в помещениях.

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

Литература

1. Wireless Power Consortium. Qi wireless charging standard [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.wirelesspowerconsortium.com/standards/qi-wireless-charging/
2. Eidaks J. et al. Efficient multi-hop wireless power transfer for the indoor environment // Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 17. – С. 7367. https://doi.org/10.3390/s23177367
3. Sasatani T. et al. Multimode quasistatic cavity resonators for wireless power transfer // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2017. – Т. 16. – С. 2746-2749. https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2744658
4. Sasatani T., Sample A.P., Kawahara Y. Room-scale magnetoquasistatic wireless power transfer using a cavity-based multimode resonator // Nature Electronics. – 2021. – Т. 4. – №. 9. – С. 689-697. https://doi.org/10.1038/s41928-021-00636-3
5. Falkenstein E., Roberg M., Popovic Z. Low-power wireless power delivery // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2012. – Т. 60. – №. 7. – С. 2277-2286. https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2193594
6. Kim S. et al. Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms // Proceedings of the IEEE. – 2014. – Т. 102. – №. 11. – С. 1649-1666. https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2357031
7. Kim J. et al. Cage-embedded crown-type dual coil wireless power transfer based microwave brain stimulation system for untethered and moving mice // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. – 2023. – Т. 17. – №. 2. – С. 362-374. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2023.3255248
8. Chow J.P.W. et al. Optimal design and experimental assessment of a wireless power transfer system for home-cage monitoring // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – Т. 34. – №. 10. – С. 9779-9793. https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2894182
9. Seregin P.S. et al. Energy-harvesting coil for circularly polarized fields in magnetic resonance imaging // Physical Review Applied. – 2022. – Т. 17. – №. 4. – С. 044014. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.044014

10. Burmistrov O.I. et al. Wireless power transfer in magnetic resonance imaging at a higher-order mode of a birdcage coil // Physical Review Applied. – 2024. – Т. 21. – №. 1. – С. 014047. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.014047
11. Bjorkqvist O., Pruessmann K.P. Stealth RF energy harvesting in MRI using selective shielding // Magnetic Resonance in Medicine. – 2024. – Т. 92. – №. 1. – С. 406-415. https://doi.org/10.1002/mrm.30048
12. Trebar M. et al. RFID data loggers in fish supply chain traceability // International Journal of Antennas and propagation. – 2013. – Т. 2013. – №. 1. – С. 875973. https://doi.org/10.1155/2013/875973
13. Chen Y.Y., Wang Y.J., Jan J.K. A novel deployment of smart cold chain system using 2G-RFID-Sys // Journal of Food Engineering. – 2014. – Т. 141. – С. 113-121. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.05.014
14. Tavana M. et al. Wireless power transfer for aircraft IoT applications: System design and measurements // IEEE Internet of Things Journal. – 2021. – Т. 8. – №. 15. – С. 11834-11846. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3072505
15. Huang J. et al. Wireless power transfer and energy harvesting: Current status and future prospects // IEEE wireless communications. – 2019. – Т. 26. – №. 4. – С. 163-169. https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800378
16. Zheng Y. et al. Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges // Space Solar Power and Wireless Transmission. – 2024. – Т. 1. – №. 1. – С. 17-26. https://doi.org/10.1016/j.sspwt.2023.12.001
17. Javed N. et al. Long-range wireless optical power transfer system using an EDFA // Optics Express. – 2022. – Т. 30. – №. 19. – С. 33767-33779. https://doi.org/10.1364/OE.468766
18. Nusrat T. et al. Far-field wireless power transfer for the Internet of Things // Electronics. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 207. https://doi.org/10.3390/electronics12010207

19. Belo D. et al. A selective, tracking, and power adaptive far-field wireless power transfer system // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Т. 67. – №. 9. – С. 3856-3866. https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2913653
20. Safety I.I. C.o. E. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz // IEEE Std C. – 2019. – Т. 95. – С. 1-312. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9238523
21. Park J.H. et al. Design and implementation of 5.8 GHz RF wireless power transfer system // IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – С. 168520-168534. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3138221
22. Lin W., Ziolkowski R.W. Wirelessly powered light and temperature sensors facilitated by electrically small omnidirectional and Huygens dipole antennas // Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 9. – С. 1998. https://doi.org/10.3390/s19091998
23. Джандалиева А., Савиных Т., Михайлов Н., Щелокова А. Влияние топологии и способа возбуждения объемных резонаторов на баланс магнитной связи и омических потерь в системах беспроводной передачи энергии // Антенны. – 2026. – Т. 2. – С. 28–37. https://doi.org/10.18127/j03209601-202602-03
24. Mikhailov N., Abrosimova M., Jandaliyeva A., Siganov M., Belov P., Shchelokova A. Multi-object charging in room-sized weakly coupled WPT system // 2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE), Kyoto, Japan, 2024, pp. 364-367.
25. Kim H., Ahn J., Rhee J., Ahn S. Compensation Capacitor Tuning Method of LCC-S Topology Wireless Power Transfer System to Implement ZVS under Various Conditions // 2023 XXXVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Sapporo, Japan, 2023, pp. 1-4.

26. Ziegelberger G. et al. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) // Health physics. – 2020. – Т. 118. – №. 5. – С. 483-524. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210
27. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection et al. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) // Health physics. – 2010. – Т. 99. – №. 6. – С. 818-836. https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86
28. International Electrotechnical Commission et al. Assessment methods of the human exposure to electric and magnetic fields from wireless power transfer systems–models, instrumentation, measurement and numerical methods and procedures (Frequency range of 1 kHz to 30 MHz) // IEC PAS. – 2021. – Т. 63184. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2025.10901988

Для цитирования:

Джандалиева А., Вдовенко А.Н., Михайлов Н.В., Белов П.А., Щелокова А.В. Объемный резонатор для беспроводной передачи энергии в частотном диапазоне стандарта Qi // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 10. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.10.2