

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ITMO University**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА/GRADUATION THESIS

**Разработка гибридного резонатора на основе метаматериала для систем беспроводной
передачи энергии**

Автор/ Author

Смирнов Павел Алексеевич

Направленность (профиль) образовательной программы/Major

Радиочастотные системы и устройства 2019

Квалификация/ Degree level

Магистр

Руководитель ВКР/ Thesis supervisor

Сун Минчжао, кандидат физико-математических наук, Университет ИТМО, физический факультет, младший научный сотрудник

Группа/Group

Z42451

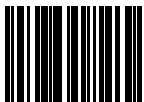
Факультет/институт/кластер/ Faculty/Institute/Cluster

физический факультет

Направление подготовки/ Subject area

16.04.01 Техническая физика

Обучающийся/Student

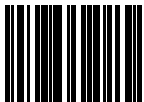
Документ подписан	
Смирнов Павел Алексеевич	
23.05.2021	

(эл. подпись/ signature)

Смирнов Павел
Алексеевич

(Фамилия И.О./ name
and surname)

Руководитель ВКР/
Thesis supervisor

Документ подписан	
Сун Минчжао	
23.05.2021	

(эл. подпись/ signature)

Сун Минчжао

(Фамилия И.О./ name
and surname)

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ITMO University**

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ /
OBJECTIVES FOR A GRADUATION THESIS**

Обучающийся / Student Смирнов Павел Алексеевич
Группа/Group Z42451
Факультет/институт/кластер/ Faculty/Institute/Cluster физико-технический факультет
Квалификация/ Degree level Магистр
Направление подготовки/ Subject area 16.04.01 Техническая физика
Направленность (профиль) образовательной программы/Major Радиочастотные системы и устройства 2019
Специализация/ Specialization Радиочастотные системы и устройства
Тема ВКР/ Thesis topic Разработка гибридного резонатора на основе метаматериала для систем беспроводной передачи энергии
Руководитель ВКР/ Thesis supervisor Сун Минчжао, кандидат физико-математических наук, Университет ИТМО, физико-технический факультет, младший научный сотрудник

Срок сдачи студентом законченной работы до / Deadline for submission of complete thesis 31.05.2021

Техническое задание и исходные данные к работе/ Requirements and premise for the thesis

Разработать резонатор на основе метаповерхности с высокой однородностью ближнего магнитного поля для применения в качестве передатчика систем беспроводной передачи энергии к нескольким устройствам одновременно.

Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов)/ Content of the thesis (list of key issues)

1. Введение
2. Принципы построения систем беспроводной передачи энергии
3. Применение метаповерхностей для улучшения характеристик систем беспроводной передачи энергии
4. Разработка и численное исследование резонатора на основе метаповерхности
5. Изготовление прототипа резонатора и его экспериментальное исследование
6. Заключение

Перечень графического материала (с указанием обязательного материала) / List of graphic materials (with a list of required material)

Исходные материалы и пособия / Source materials and publications

1. Song M., Belov P., Kapitanova P. Wireless power transfer inspired by the modern trends in

electromagnetics // Appl. Phys. Rev. 2017. T. 4. № 2.

2. Song M. et al. Multi-mode metamaterial-inspired resonator for near-field wireless power transfer // Appl. Phys. Lett. 2020. T. 117. № 8. С. 083501.

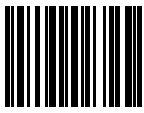
3. Markvart A. et al. Metasurface for Near-Field Wireless Power Transfer with Reduced Electric Field Leakage // IEEE Access. 2020. T. 8. С. 40224–40231.

4. Jawad A. M. et al. Opportunities and Challenges for Near-Field Wireless Power Transfer: A Review // Energies. – 2017. – Vol. 10. – P. 1022.

Дата выдачи задания/ Objectives issued on 20.03.2021

СОГЛАСОВАНО / AGREED:

Руководитель ВКР/
Thesis supervisor

Документ подписан	
Сун Минчжао	
20.03.2021	

(эл. подпись)

Сун Минчжао

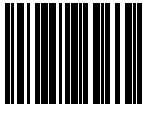
Задание принял к
исполнению/ Objectives
assumed by

Документ подписан	
Смирнов Павел Алексеевич	
23.03.2021	

(эл. подпись)

Смирнов Павел
Алексеевич

Руководитель ОП/ Head
of educational program

Документ подписан	
Глыбовский Станислав Борисович	
19.05.2021	

(эл. подпись)

Глыбовский
Станислав
Борисович

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ITMO University**

**АННОТАЦИЯ
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ /
SUMMARY OF A GRADUATION THESIS**

Обучающийся/ Student

Смирнов Павел Алексеевич

Наименование темы ВКР / Title of the thesis

Разработка гибридного резонатора на основе метаматериала для систем беспроводной передачи энергии

Наименование организации, где выполнена ВКР/ Name of organization

Университет ИТМО

**ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ/
DESCRIPTION OF THE GRADUATION THESIS**

1. Цель исследования / Research objective

Разработка и исследование гибридного резонатора на основе метаповерхности с высокой однородностью магнитного поля для применения в системах БПЭ в качестве передатчика.

2. Задачи, решаемые в ВКР / Research tasks

1) Разработать численную модель гибридного резонатора на основе метаповерхности и изучить влияние геометрических и материальных параметров резонатора на его электродинамические характеристики; 2) Выполнить численное моделирование резонатора, настроить его резонансную частоту в диапазоне 26,5–27,5 МГц и достигнуть однородности поля более 90 % в области, составляющей как минимум половину его общей площади; 3) Численно исследовать радиочастотную безопасность гибридного резонатора, с помощью оценки коэффициента удельного поглощения электромагнитной энергии (SAR) в воксельной модели руки человека; 4) Изготовить прототип гибридного резонатора и провести экспериментальные измерения его электродинамических характеристик.

3. Краткая характеристика полученных результатов / Short summary of results/conclusions

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была предложена и изучена конструкция гибридного резонатора на основе метаматериала для использования в системах беспроводной передачи энергии в качестве передатчика, а также проведено численное и экспериментальное исследование ее характеристик. Как показал анализ собственных мод, в структуре поддерживается мода характеризующаяся равномерным распределением магнитного поля над всей площадью резонатора, которая может быть применена для беспроводной передачи энергии (БПЭ). С помощью оптимизации параметров диэлектрических вставок, а так же расположения проводников в каждом из слоев структуры было получено однородное распределение магнитного поля в области 28 x 28 см, при этом коэффициент вариации напряженности поля в этой области составил 4%,

что было подтверждено экспериментально. В этой же области максимальная эффективность беспроводной передачи энергии достигает 70 % и не зависит от конкретного расположения приемника. Численная оценка радиочастотной безопасности показала, что предложенный резонатор обеспечивает в десятки раз меньший уровень SAR = 11 мВт/кг (при 1 Вт входной мощности) по сравнению с планарной спиральной катушкой того же размера. Все это делает предложенную конструкцию перспективной для применения в системах БПЭ «один-ко-многим» в качестве передатчика.

4. Наличие публикаций по теме выпускной работы/ Have you produced any publications on the topic of the thesis

- 1 Smirnov P., Song M., Kapitanova P.V. Numerical Study of Hybrid Metasurface as WPT Transmitter//AIP Conference Proceedings, 2020, Vol. 2300, pp. 020119 (Статья; Scopus, Web of Science)

5. Наличие выступлений на конференциях по теме выпускной работы/ Have you produced any conference reports on the topic of the thesis

- 1 Международная конференция по нанофотонике и метаматериалам «МЕТАНАНО-2020», 14.09.2020 - 18.09.2020 (Конференция, статус - международный)

6. Полученные гранты, при выполнении работы/ Grants received while working on the thesis

7. Дополнительные сведения/ Additional information

Обучающийся/Student

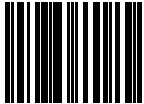
Документ подписан	
Смирнов Павел Алексеевич	
23.05.2021	

(эл. подпись/ signature)

Смирнов Павел
Алексеевич

(Фамилия И.О./ name
and surname)

Руководитель ВКР/
Thesis supervisor

Документ подписан	
Сун Минчжао	
23.05.2021	

(эл. подпись/ signature)

Сун Минчжао

(Фамилия И.О./ name
and surname)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Принципы построения систем беспроводной передачи энергии.....	11
1.1 Классификация систем БПЭ.....	11
1.2 Магнитно-резонансная передача энергии.....	16
1.3 Радиочастотная безопасность систем БПЭ.....	21
1.4 Системы БПЭ «один-ко-многим»	23
2 Применение метаповерхностей для улучшения характеристик систем БПЭ	27
2.1 Метаповерхности для управления магнитным полем передатчика	27
2.2 Резонаторы на основе метаповерхностей в системах БПЭ.....	28
3 Разработка и численное исследование гибридного резонатора на основе метаповерхности	31
3.1 Дизайн резонатора и принцип работы	32
3.2 Анализ собственных мод.....	33
3.3 Оптимизация резонансной частоты и распределения поля.....	37
3.4 Эффективность беспроводной передачи энергии.....	42
3.5 Электрическое поле резонатора и радиочастотная безопасность.....	44
4 Изготовление и экспериментальное исследование прототипа резонатора..	48
4.1 Конструкция и изготовление прототипа	48
4.2 Стендовые измерения	49
4.3 Сравнительный анализ	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	56

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая выпускная квалификационная работа посвящена разработке гибридного резонатора на основе метаматериала с высокой однородностью ближнего магнитного поля для применения в качестве излучателя в системах беспроводной передачи энергии (БПЭ).

Технология БПЭ, а именно передачи электромагнитной энергии от источника к нагрузке без их непосредственного физического соединения с помощью электрических проводов либо волноведущих структур, в настоящее время является стремительно развивающимся направлением научных и инженерных исследований. Одна из главных причин для этого – интенсивный рост числа мобильных устройств [1], таких как смартфоны, умные часы, наушники и многие другие. Они ежедневно используются людьми, но требуют регулярного заряда встроенных в них аккумуляторных батарей. Когда у одного человека появляется слишком много таких устройств, использование традиционных проводных адаптеров питания оказывается неудобным, а БПЭ может стать удобной альтернативой для них.

Впервые идея БПЭ появилась еще в начале XX века и принадлежала знаменитому изобретателю и новатору Николе Тесле [2]. Им же были проведены и первые эксперименты, подтверждающие эту идею, однако на тот момент, в силу слабого технологического развития и отсутствия большой потребности в этой технологии, она не прижилась. Сейчас, в течение уже последних двух десятилетий, она находит свое широкое применение в промышленной и потребительской электронике, где обычно используется для передачи энергии от одного передатчика к одному приемнику. При применении для этого принципа магнитной индукции [3,4] и стандартной для него конструкции системы БПЭ: приемник и передатчик, выполненные в виде катушек индуктивности одинаковых размеров, располагаются соосно и на малом расстоянии друг от друга, что обеспечивает их сильную магнитную связь, можно обеспечить достаточно высокую эффективность. При этом отклонение от этих условий приводит к

критичному падению эффективности системы. Однако намного более интересный сценарий использования БПЭ – одновременное питание нескольких устройств, расположенных на передатчике. Для его реализации обычно используется передатчик, состоящий из целого набора катушек, которые перекрывают друг друга [5]. При размещении приемника происходит избирательное включение тех катушек, которые находятся ближе всего к нему для того, чтобы обеспечить высокую эффективность. Такая архитектура системы является достаточно сложной, поскольку помимо элементов, непосредственно необходимых для БПЭ (приемная и передающая катушки, силовые преобразователи и согласующие цепи), в ней присутствуют элементы для определения местоположения приемника и переключения катушек передатчика, что делает ее сложной в изготовлении и управлении, а также весьма дорогостоящей. Помимо этого, у нее есть ряд других недостатков, присущих устройствам БПЭ, построенным на основе катушек индуктивностей в качестве передатчика и приемника: высокая концентрация электрического поля вблизи структуры, что ограничивает максимально возможную для передачи мощность; резкое снижение эффективности при изменении состояния системы от оптимального (относительное расположение катушек, их наклон и т.д.).

Ранее, для частичного решения упомянутых выше проблем, было предложено использовать в системах БПЭ резонаторы на основе метаповерхности в качестве излучающих элементов [6]. Были предложены и несколько конструкций подобных резонаторов [7,8], которые, несмотря на свои достоинства, такие как низкий уровень SAR, большая область с высокой напряженностью магнитного поля, которое и отвечает за перенос энергии, имеют и недостатки: неоднородное поле в рабочей области, не технологичность изготовления.

Данная выпускная квалификационная работа нацелена на развитие идеи применения в качестве излучающих элементов систем БПЭ резонаторов на основе метаповерхностей и на улучшение существующих конструкций резонаторов с целью повышения их применимости в реальных потребительских

устройствах БПЭ. Для этого в работе предложена новая конструкция резонатора на основе метаповерхности, а именно – гибридный резонатор. Гибридный резонатор характерен тем, что не весь его объем заполняется диэлектриком с высокой диэлектрической проницаемостью, а только малая часть. Некоторые реализации таких резонаторов известны в литературе, однако ранее они применялись только для повышения качества МРТ изображений [9–11]. В этой работе будут исследованы характеристики гибридного резонатора на основе метаповерхности для использования их в качестве передатчика энергии системы БПЭ.

Целью настоящей работы является разработка и исследование гибридного резонатора на основе метаповерхности с высокой однородностью магнитного поля для применения в системах БПЭ в качестве передатчика. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) Разработать численную модель гибридного резонатора на основе метаповерхности и изучить влияние геометрических и материальных параметров резонатора на его электродинамические характеристики;
- 2) Выполнить численное моделирование резонатора, настроить его резонансную частоту в диапазоне 26,5–27,5 МГц и достигнуть однородности поля более 90 % в области, составляющей как минимум половину его общей площади;
- 3) Численно исследовать радиочастотную безопасность гибридного резонатора с помощью оценки коэффициента удельного поглощения электромагнитной энергии (SAR) в воксельной модели руки человека;
- 4) Изготовить прототип гибридного резонатора и провести экспериментальные измерения его электродинамических характеристик.

Практическая значимость работы заключается в том, что предлагаемый гибридный резонатор на основе метаповерхности может заменить собой классические передатчики систем БПЭ, выполненные в виде спиральных планарных катушек индуктивности, позволяя обеспечить высокую эффективность и

ее устойчивость к относительному расположению приемника и передатчика, а также увеличить радиочастотную безопасность для человека.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые разработан гибридный резонатор на основе метаповерхности для систем БПЭ, численно и экспериментально показано его преимущество в однородности магнитного поля и радиочастотной безопасности по сравнению с классическими передатчиками БПЭ.

При выполнении поставленных задач были использованы численные и экспериментальные методы исследования. Для построения моделей резонатора, численного расчета их характеристик был применен пакет прикладных программ электродинамического моделирования CST Microwave Studio 2017, в котором для расчетов были использованы метод собственных мод и метод конечного интегрирования. В ходе экспериментального исследования резонатора измерялись элементы матрицы рассеяния с помощью векторного анализатора цепей, а также строились карты распределения магнитного поля. Для обработки экспериментальных данных использовался пакет прикладных программ MATLAB 2020b.

Результаты работы были представлены на 5-й международной конференции по метаматериалам и нанофотонике «METANANO 2020» [12]. Также, на предложенную конструкцию резонатора получен патент на полезную модель № RU 202324 U1 [13].

1 Принципы построения систем беспроводной передачи энергии

В данной главе в первую очередь будет приведена классификация систем беспроводной передачи энергии, описаны физические принципы, которые стоят за каждым классом систем. Затем более подробно будет описан принцип магнитно-резонансной передачи энергии, поскольку именно он в настоящее время является наиболее распространенной основой для построения высокоэффективных систем БПЭ в сфере потребительской электроники, а также потому, что в настоящей работе будет проводиться разработка системы, основанной именно на этом принципе. Будет приведен анализ самой простой принципиальной схемы системы, состоящей из двух резонансных катушек, в ходе которого будет изучена эффективность системы. Также, будет введено понятие максимально возможной эффективности, основанное на представлении системы БПЭ в виде четырехполюсника, подключенного с одной стороны к генератору, а с другой к нагрузке, поскольку оно будет использоваться в работе для сравнения разработанного резонатора с другими системами. Для этой же цели будет рассмотрена радиочастотная безопасность систем БПЭ и стандарты, регламентирующие максимальное воздействие электронных устройств на человека. И в конце будет приведен обзор работ посвященных системам БПЭ «один-ко-многим».

1.1 Классификация систем БПЭ

В зависимости от природы механизма переноса энергии системы БПЭ можно разделить на неэлектромагнитные и электромагнитные, которые, в свою очередь, подразделяются в зависимости от дальности действия и зоны электромагнитного поля передатчика, в котором располагается приемник, на ближнепольные и дальнопольные системы [14]. В качестве основного меха-

низма передачи энергии для ближнепольных систем может служить емкостная, индуктивная либо магнитно-резонансная связь, а дальнепольные системы в зависимости от рабочей частоты делятся на радиочастотные, миллиметровые и оптические. Схематично классификация систем БПЭ приведена на рисунке 1.

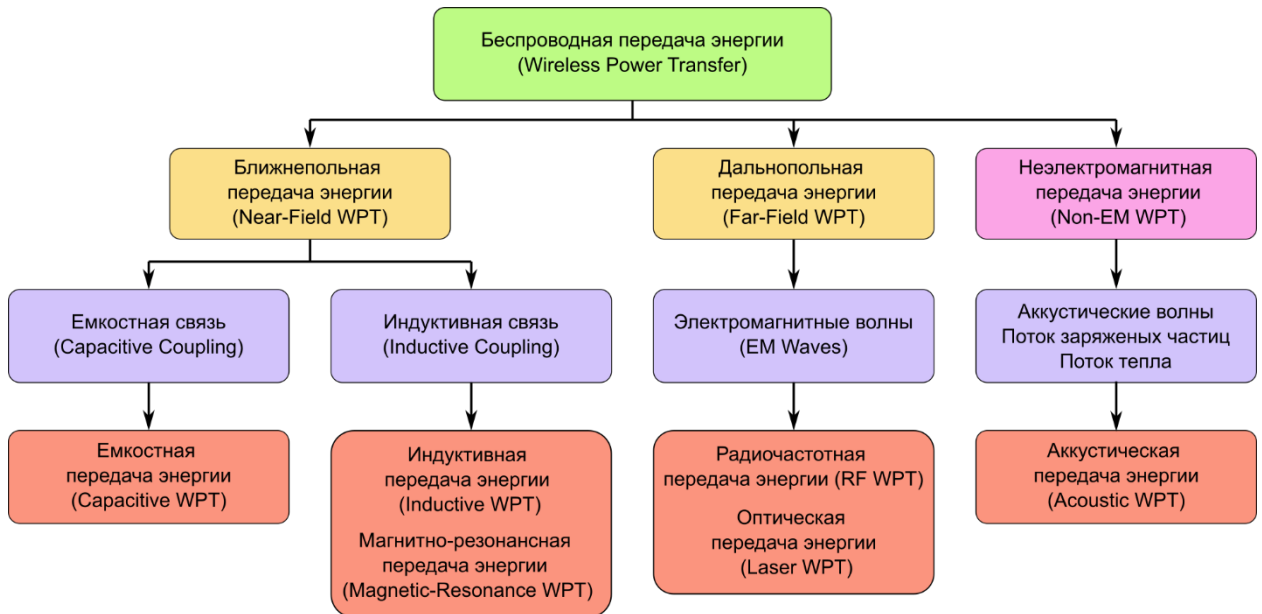


Рисунок 1 – Классификация систем БПЭ

Ближнепольные (англ. near-field) системы, называемые также неизлучающими, характеризуются расстоянием между приемником и передатчиком много меньшим рабочей длины волны [15]. Мощность в таких системах передается либо за счет электрической, либо магнитной связи между приемником и передатчиком. Если связь осуществляется в основном за счет электрического поля, такая передача энергии называется емкостной передачей энергии [16]. Отличительной особенностью таких систем является высокая эффективность, которая, однако, реализуется только при относительно малых расстояниях между передатчиком и приемником, которые представляют собой два металлических электрода, которые можно представить в виде двух обкладок конденсатора, откуда и берется название «емкостная». При работе системы, вблизи нее возникает высокая напряженность электрического поля высокой частоты, что негативно сказывается на биологических объектах, расположенных вблизи, вызывая их нагрев [17]. В связи с этим довольно часто она находит

свое применение в маломощных системах передачи энергии, например при передаче энергии между интегральными схемами [18] или биомедицинскими имплантатами [19]. Однако существуют также работы, в которых емкостная передача энергии используется для передачи большой мощности, что оправдано при условии нахождения человека на достаточном расстоянии от системы во время БПЭ, что выполняется, например, при беспроводной зарядке автомобилей. Так, например, в [20] демонстрируется передача 2,4 кВт мощности на расстоянии 150 мм с эффективностью 90,8 %.

Для связи между передатчиком и приемником может использоваться также магнитное поле. Наиболее широко известный, при этом, метод БПЭ, который использует магнитную связь между двумя катушками индуктивности, называется индуктивной передачей энергии [21]. Принцип его работы заключается в том, что при протекании переменного тока по одной из катушек, в соответствии с законом Ампера, создается переменное магнитное поле, которое пронизывает вторую катушку. Магнитный поток, пронизывающий катушку, наводит на ней ЭДС, по закону Фарадея, что порождает в ней электрический ток. Этот механизм широко используется, например, в трансформаторах, но не нашел применения в других областях передачи энергии, поскольку обладает существенными недостатками, такими как огромные потери мощности при уменьшении связи (увеличении расстояния) между катушками.

Для того чтобы преодолеть ограничения, присущие индуктивной передаче энергии, было предложено обеспечить работу системы в резонансном режиме. Этого можно добиться путем подключения конденсаторов к катушкам индуктивности, с помощью которых приемник и передатчик настраиваются на одинаковую частоту резонанса. Дополнительные емкости, а в некоторых случаях более сложные схемы, которые подключаются к катушкам, называются компенсационными цепями. Эта технология получила название магнитно-резонансная передача энергии. В 2007 году впервые была предложена магнитно-резонансная передача энергии с сильно связанными высокочастотными резонансными элементами.

наторами [3], тогда как до этого исследовались системы с малой добротностью. В этой работе была экспериментально продемонстрирована передача мощности достаточной для зажигания лампы накаливания с эффективностью 40 % на расстояние 2 метра.

В настоящий момент подавляющее большинство исследований направлены именно на разработку магнитно-резонансных систем, поскольку они довольно хорошо себя показывают с точки зрения эффективности, максимальной мощности, безопасности и дальности, поэтому являются отличным выбором для построения систем БПЭ, направленных на массовое использование. К примеру, подробно ознакомиться с примерами применения магнитно-резонансной передачи энергии для медицинских имплантов можно в [22], для зарядки электрических транспортных средств – в [23], однако этими сферами ее применение не ограничивается и существуют работы, в которых она применена для зарядки беспилотных летательных аппаратов [24], роботов [25,26], смартфонов [27,28]. Стоит также отметить основные недостатки присущие магнитно-резонансным системам, которые заключаются в наведении поверхностных токов на металлических объектах, неустойчивости передачи энергии к смещению и повороту катушек приемника и передатчика относительно друг друга.

Альтернативным подходом к увеличению дальности передачи энергии является работа в дальней зоне антенн [29]. Дальнопольные (англ. far-field) системы характеризуются расстоянием между передающей и приемной антенной много больше длины волны, при этом носителем энергии являются не в отдельности электрическое или магнитное поле, а электромагнитные волны, распространяющиеся в дальней зоне антенны. При распространении волны в пространстве, она затухает пропорционально квадрату расстояния между антеннами, поэтому для повышения эффективности передачи энергии используются высоконаправленные антенны, антенные решетки. Дальнопольные системы, в свою очередь, могут быть разделены на различные классы в зависи-

мости от рабочей частоты. Существуют радиочастотные [29] и оптические (лазерные) [30] системы дальнопольной БПЭ. Каждая из них отличается по сложности, стоимости изготовления передатчиков, используемой элементной базе для схемотехники, затуханию при распространении в радиоканале и другим параметрам. Было показано, что дальнопольная передача энергии может быть использована для питания беспилотных летательных аппаратов [31,32], спутников [33,34], а также для одновременной передачи информации и энергии в телекоммуникационных сетях [35]. Преимущества таких систем заключаются в колоссальной дальности, которой невозможно добиться с помощью другим методов. Если говорить о недостатках, то к ним относится повышенная опасность для человека, которая возникает за счет того, что из-за высокой направленности антенн и большой мощности, которая подается в систему из-за высокого затухания в радиоканале, в пространстве возникают области с повышенной напряженностью электромагнитного поля. Если человек или любой другой биологический объект будет долгое время находиться в этой области, то это приведет к значительному нагреву тканей [17].

Существуют также системы БПЭ, в которых энергия передается не с помощью электромагнитных волн. В качестве переносчика энергии в таких системах могут выступать, например, акустические волны, потоки заряженных частиц или тепла. Однако, как было отмечено во введении, по определению, БПЭ это технология передачи именно электромагнитной энергии. Таким образом, перечисленные носители являются лишь промежуточным звеном при передаче энергии и требуют использования различных методов прямого и обратного преобразования в электрическую энергию. Из-за того, что в настоящее время наиболее эффективно возможно преобразование электрических колебаний в механические колебания различных мембран [36], создающих акустические волны, именно акустическая передача энергии является перспективной технологией БПЭ [37]. Поскольку целью работы не является разработка акустической системы БПЭ, то ограничимся лишь ее упоминанием и не будем рассматривать конкретные устройства систем.

1.2 Магнитно-резонансная передача энергии

Поскольку наиболее перспективной и широко распространенной технологией БПЭ в настоящий момент является магнитно-резонансная передача энергии, которая осуществляется за счет магнитной связи между двумя резонансными катушками, имеет смысл теоретически определить основные характеристики такой системы и ввести понятие эффективности. Для этого рассмотрим эквивалентную схему системы БПЭ, представленную на рисунке 2, где L_{tx} , C_{tx} и R_{tx} соответственно собственная индуктивность катушки, емкость, которой регулируется резонансная частота и сопротивление катушки передатчика, L_{rx} , C_{rx} и R_{rx} – индуктивность приемной катушки, емкость, настраивающая ее резонансную частоту и ее сопротивление, V_S – напряжение источника, R_L – сопротивление нагрузки, M – взаимная индуктивность между приемной и передающей катушками.

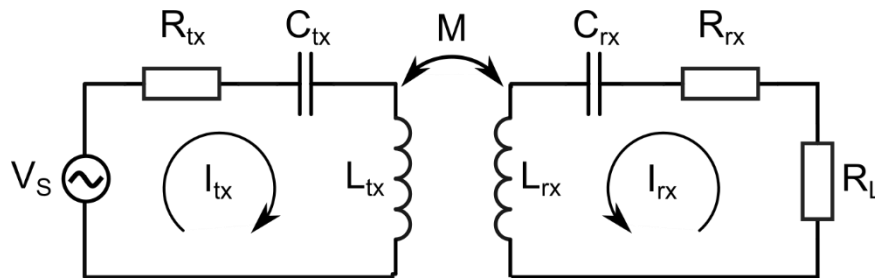


Рисунок 2 – Принципиальная схема системы БПЭ из двух связанных резонаторов

Мы можем записать уравнение системы в матричном виде следующим образом:

$$\begin{bmatrix} Z_{tx} & j\omega M \\ j\omega M & Z_{rx} + R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{tx} \\ I_{rx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_S \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $Z_{tx} = R_{tx} + j\omega L_{tx} - j / \omega C_{tx}$ – собственный импеданс передатчика;

$Z_{rx} = R_{rx} + j\omega L_{rx} - j / \omega C_{rx}$ – импеданс приемника.

Из матричного уравнения (1) могут быть легко найдены токи приемника и передатчика, которые на резонансной частоте, при которой $\omega L_{rx} = 1 / \omega C_{rx}$, равны:

$$I_{rx} = \frac{-j\omega M V_S}{\omega^2 M^2 + R_{tx}(R_L + R_{rx})} \quad (2)$$

$$I_{tx} = \frac{V_S(R_L + R_{rx})}{\omega^2 M^2 + R_{tx}(R_L + R_{rx})}. \quad (3)$$

Зная токи в цепи приемника и передатчика, мы можем определить полную мощность системы P_{tot} и мощность, поступившую в нагрузку P_L :

$$P_{tot} = \frac{1}{2} V_S I_{tx} \quad (4)$$

$$P_L = \frac{1}{2} R_L |I_{rx}|^2. \quad (5)$$

Эффективность системы БПЭ равняется отношению мощности, выделяющейся в нагрузку (5) к общей мощности (4), поступившей в систему от источника. Подставляя в них выражения для токов (2) и (3), эффективность запишется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{tot}} = \frac{R_L \omega^2 M^2}{(\omega^2 M^2 + R_{tx}(R_L + R_{rx}))(R_L + R_{rx})}. \quad (6)$$

Из полученного выражения можно найти оптимальную нагрузку, при которой достигается максимальная эффективность. Для этого возьмем частную производную от (6) по R_L и найдем экстремум функции эффективности. В результате получаем оптимальное сопротивление нагрузки:

$$R_{L_{opt}} = \frac{\sqrt{R_{tx} R_{rx} (\omega^2 M^2 + R_{tx} R_{rx})}}{R_{tx}}. \quad (7)$$

Подставляя оптимальное сопротивление нагрузки (7) в выражение (6) и упрощая полученное выражение, запишем формулу максимальной эффективности:

$$\eta_{opt} = \frac{k^2 Q_{tx} Q_{rx}}{\left(1 + \sqrt{k^2 Q_{tx} Q_{rx} + 1}\right)^2}, \quad (8)$$

где $k = M / \sqrt{L_{tx} L_{rx}}$ – коэффициент связи катушек индуктивности, Q_{tx} и Q_{rx} – соответственно добротности передатчика и приемника.

Системы для которых множитель $k^2 Q_{tx} Q_{rx} \gg 1$ называются сильно связанными, а те у которых $k^2 Q_{tx} Q_{rx} \ll 1$ – слабо связанными [38]. Из формулы (8) можно заметить, что высокая эффективность при согласованной нагрузке может быть достигнута с помощью увеличения произведения $k^2 Q_{tx} Q_{rx}$. Таким образом, двумя основными способами увеличения эффективности является увеличение коэффициента связи между катушками и увеличение добротностей передатчика и приемника.

Полученная формула расчета эффективности (6) оказывается не очень удобной для применения на практике. Поэтому дальше в работе для расчета эффективности будет использован несколько иной метод, согласно которому система БПЭ будет рассматриваться как четырехполюсник, к которому к одному из входов подключен источник сигнала, а ко второму – нагрузка, как показано на рисунке 3. В этом методе мы будем оперировать не токами и напряжениями, как раньше, а коэффициентами отражения и прохождения от входов четырехполюсника, которые в действительности измеряются при анализе устройства с помощью векторного анализатора цепей.

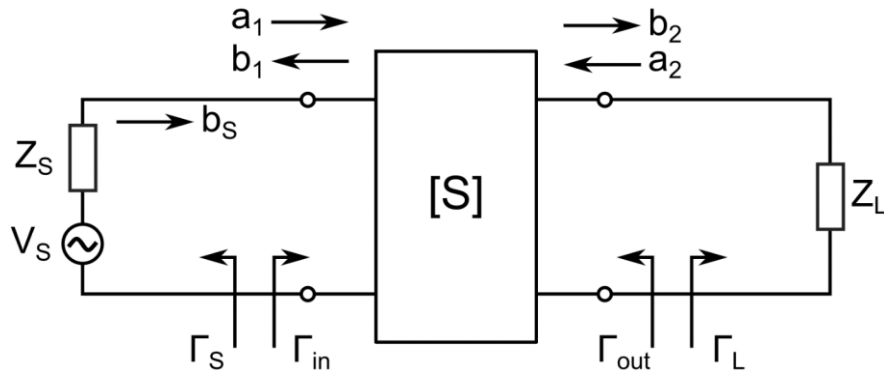


Рисунок 3 – Представление системы БПЭ в виде четырехполюсника

Эффективность в этом случае также является отношением мощности, поступившей в нагрузку, но к максимальной мощности, которая может поступить от источника в цепь. Мощность в нагрузке определяется как разность мощностей поступающей в нагрузку и отраженной от нее волн. Для вычисления мощности, максимально доступной из источника нужно учитывать отражение волны от первого входа четырехполюсника, которое возникает при несогласованных сопротивлениях источника и четырехполюсника. Таким образом, эффективность равна:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{avs}} = \frac{P_L^{inc} - P_L^{ref}}{|b_s|^2 / (1 - |\Gamma_s|^2)} = \frac{|b_2|^2 (1 - |\Gamma_L|^2) (1 - |\Gamma_s|^2)}{|b_s|^2}, \quad (9)$$

где P_L^{inc} и P_L^{ref} – мощности волн, поступившей в нагрузку и отраженной от нее соответственно,

b_s – амплитуда волны на выходе источника,

Γ_s – коэффициент отражения от источника,

Γ_L – коэффициент отражения от нагрузки,

b_2 – амплитуда волны поступившей в нагрузку.

Используя упрощенный метод анализа СВЧ цепей с помощью сигнального графа [39], можно легко записать отношение $|b_2|^2 / |b_s|^2$ через S-параметры четырехполюсника и коэффициенты отражения от источника и нагрузки. В результате получим следующее выражение:

$$\eta = \frac{|s_{21}|^2 (1 - |\Gamma_L|^2) (1 - |\Gamma_S|^2)}{|(1 - s_{11}\Gamma_S)(1 - s_{22}\Gamma_L) - s_{21}s_{12}\Gamma_L\Gamma_S|^2}. \quad (10)$$

Если в исследуемой нами системе БПЭ, представленной в виде четырех-полюсника, будет отсутствовать отражение сигналов от источника и нагрузки, то будет наблюдаться максимум эффективности передачи энергии в этой системе, который будет равен квадрату модуля коэффициента прохождения четырехполюсника $|s_{21}|^2$. Из теории устройств СВЧ известно, что это достигается при условии идеального согласования четырёхполюсника с источником и линией передачи на стороне первого порта и с нагрузкой и линией передачи со второго. Условием идеального согласования является равенство входного сопротивления источника комплексно сопряженному сопротивлению со стороны первого порта, и аналогично с другой стороны. Таким образом, можем записать условие идеального согласования следующим образом для нагрузки и источника:

$$\Gamma_{in} = s_{11} + \frac{s_{21}s_{12}\Gamma_L}{1 - s_{22}\Gamma_L} = \frac{s_{11} - \Delta\Gamma_L}{1 - s_{22}\Gamma_L} = \Gamma_S^* \quad (11)$$

$$\Gamma_{out} = s_{22} + \frac{s_{21}s_{12}\Gamma_S}{1 - s_{11}\Gamma_S} = \frac{s_{22} - \Delta\Gamma_S}{1 - s_{11}\Gamma_S} = \Gamma_L^*. \quad (12)$$

Решая систему уравнений (11) и (12), получаем значения коэффициентов отражения, при которых вся мощность источника поступит в нагрузку:

$$\Gamma_S = \frac{B_1 \mp \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} \quad (13)$$

$$\Gamma_L = \frac{B_2 \mp \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2}, \quad (14)$$

где $B_1 = 1 + |s_{11}|^2 - |s_{22}|^2 - |\Delta|^2$,
 $B_2 = 1 + |s_{22}|^2 - |s_{11}|^2 - |\Delta|^2$,

$$C_1 = s_{11} - \Delta s_{22}^*,$$

$$C_2 = s_{22} - \Delta s_{11}^*.$$

Если подставить (13) и (14) в уравнение (10), получится выражение максимально доступной эффективности для системы БПЭ, которое не учитывает возможное рассогласование системы с источником и нагрузкой и может использоваться для оценки эффективности радиочастотного канала передачи энергии. Таким образом, мы получили удобное для расчётов выражение для оценки систем БПЭ, в которое входят только S-параметры четырехполюсника, которые можно легко получить в результате измерений системы с помощью векторного анализатора цепей. Максимально доступная эффективность будет использоваться далее также для сравнения различных систем БПЭ между собой.

1.3 Радиочастотная безопасность систем БПЭ

Во время передачи энергии системы БПЭ создают вокруг себя электромагнитные поля, которые неизбежно будут воздействовать на людей и другие биологические объекты [17]. При большой напряженности этих полей они могут нанести существенный вред за счет перегрева тканей живых организмов, которые располагаются вблизи системы. Необходимость контролировать уровень такого воздействия является одним из факторов, который ограничивает максимально допустимую для передачи мощность системы. Для количественной оценки теплового воздействия электромагнитного поля на человека применяется такой показатель, как коэффициент удельного поглощения электромагнитной энергии (Specific Absorption Rate – SAR). Значение SAR зависит от напряженности электрического поля и параметров тканей следующим образом:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{2\rho}, \quad (15)$$

где σ – проводимость ткани,
 E – напряженность электрического поля,
 ρ – плотность ткани.

Как видно из формулы, чтобы снизить негативное влияние систем БПЭ на человека, необходимо уменьшить напряженность электрического поля, которую они создают в той области, где потенциально могут находиться живые объекты, однако при этом для эффективной передачи энергии необходимо чтобы напряженность магнитного поля оставалась высокой, поскольку именно она отвечает за перенос энергии в системе.

В настоящее время существует несколько локальных и международных организаций, которые регламентируют максимальные значения SAR . Соответствующие стандарты подготовлены, например, Международной комиссией по защите от неионизирующего излучения (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) [40], Федеральной комиссией по телекоммуникациям (Federal Communication Commission) [41], а так же Институтом инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [42]. Стоит заметить, что к настоящему моменту в России не введены стандарты, которые непосредственно ограничивают SAR , поэтому, когда при разработке радиотехнических устройств встает вопрос оценки теплового воздействия на человека и его ограничения, следует придерживаться международных стандартов, названных выше. С другой стороны, в России приняты санитарные правила и нормы, которые регламентируют предельные уровни напряженности электрического поля, которые также следует учитывать при разработке систем БПЭ [43]. В таблице 1 представлено сравнение основных документов, ограничивающих воздействие электромагнитных полей на человека. Значения SAR в таблице приведены для усреднения по 10 граммам тканей, если не указано иное. Для международных стандартов предельная напряженность электрического поля задается с помощью формул, которые можно найти в соответствующих документах, а в таблице для простоты приведены значения, рассчитанные для частоты 27 МГц.

Таблица 1 – Сравнение международных и локальных стандартов, регулирующих предельные уровни SAR и напряженности электрического поля

	SAR (конечности), Вт/кг	SAR (голова и туловище), Вт/кг	Предельная напря- женность электри- ческого поля, В/м
ICNIRP [40]	4	2	67
IEEE [42]	4	2	30,5
FCC [41]	4	1,6 (1 г)	30,5
СанПиН [43]	–	–	10

1.4 Системы БПЭ «один-ко-многим»

С тех пор как была предложена магнитно-резонансная БПЭ в [3], была широко изучена передача энергии от одного передатчика к одному приемнику, однако, с течением времени происходило все более активное внедрение БПЭ в потребительскую и медицинскую электронику, началось использование для зарядки электромобилей, и в целом происходило стремительное увеличение количества устройств с беспроводным питанием. Из-за этого возникла необходимость в БПЭ одновременно к нескольким приемникам. Использование классических систем «один-к-одному» все еще возможно при большом количестве приемников, но из-за необходимости иметь на каждое приемное устройство по одному передающему это привело бы к увеличению стоимости, размеров и сложности систем.

Потенциал магнитно-резонансных систем для БПЭ к нескольким приемникам был впервые показан в [44], где осуществлялось питание нескольких маленьких резонансных приемников от большой передающей катушки, например, как показано на рисунке 4 (а). Основная проблема такой системы заключается в расщеплении резонансной частоты, которое происходит при увеличении связи между приемниками, если они обладают высокой добротностью. Эта проблема ограничивает минимальное расстояние между приемниками и,

следовательно, их максимальное количество. Позднее появились работы, в которых решается эта проблема путем оптимизации системы для заранее заданной конфигурации приемных катушек (их количества, размеров и положения на передатчике). В [45] представлена система с тремя приемными катушками, в которой снижение эффективности за счет изменения взаимной связи составляет менее 5 % при общей эффективности системы 78 %. Из недостатков предложенного решения стоит отметить то, что оптимальное состояние возможно только для заранее определенного числа приемников и их сопротивления нагрузки и никак не подстраивается в реальном времени под текущее состояние системы.

Вышеупомянутая система БПЭ «один-ко-многим» – одночастотная и может быть использоваться только для одновременного питания нескольких устройств, как схематично показано на рисунке 4 (б), что не подходит для некоторых практических применений, где следует питать только некоторые из приемников. Основными направлениями в развитии систем «один-ко-многим» с магнитно-резонансной связью являются решение задач селективной передачи энергии и одновременного питания устройств, работающих с различными стандартами. На рисунке 4 (в) схематично показано распределение мощности для селективной БПЭ. Эта концепция управления питанием в системах БПЭ позволяет передавать энергию не сразу всем приемникам, а только целевым. Чаще всего это реализуется с помощью использования различных несущих частот для каждого из приемников. Такая технология многочастотной БПЭ была тщательно разработана и внедрена как для питания приемников различных стандартов [46–48], так и для селективной БПЭ [49,50].

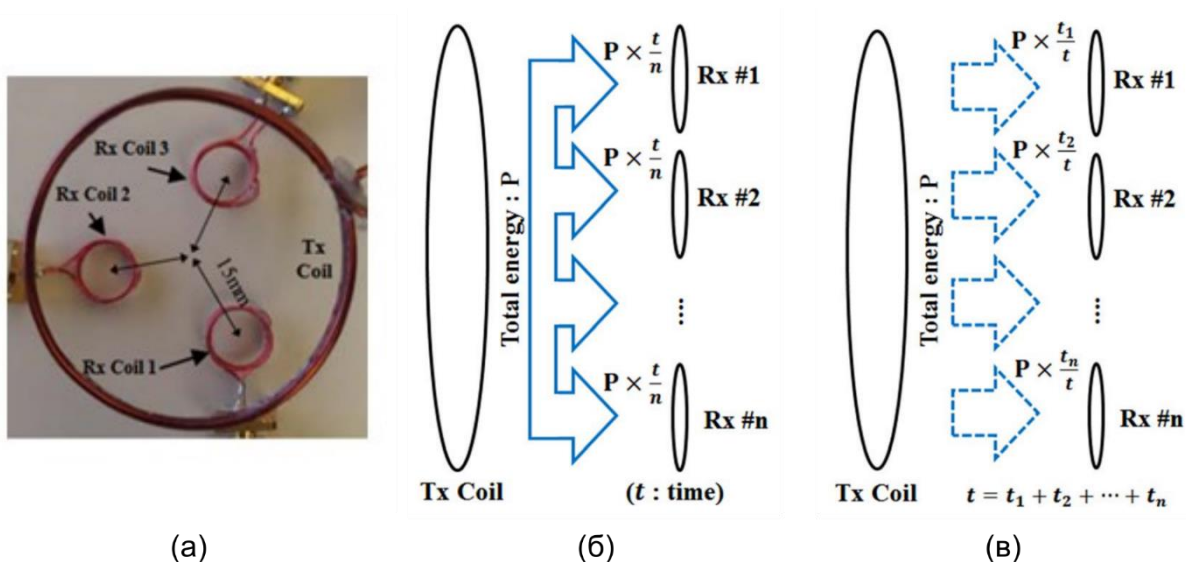


Рисунок 4 – Система беспроводной передачи энергии «один-ко-многим»:
 (а) прототип системы БПЭ «один-ко-многим»; (б) схема распределения мощности в неизбирательной системе; (в) схема распределения мощности в избирательной системе [50]

В многочастотных системах БПЭ существует проблема снижения эффективности системы при увеличении коэффициента связи между приемниками, настроенными на близкие резонансные частоты. Для решения этой проблемы было предложено применять вспомогательные полосно-пропускающие и полосно-заграждающие фильтры на стороне приемников, позволяющие уменьшить помехи между ними и увеличить максимально допустимый коэффициент связи, при котором не происходит снижения эффективности [51], а также повысить саму эффективность системы в среднем на 12 % [52].

Многочастотная БПЭ может быть использована не только для обеспечения селективности, но и для повышения эффективности обычных систем. Расщепление резонансной частоты, возникающее в системах с сильно связанными высокочастотными резонаторами, и являющееся их существенным недостатком из-за снижения эффективности, может быть использовано для многочастотной передачи мощности, когда несущий сигнал состоит из нескольких гармоник, частоты которых соответствуют четной и нечетной модам системы связанных резонаторов, что позволяет увеличить эффективность. Было также показано, что сигналы с высоким отношением пиковой мощности к средней,

которым, в частности, является многочастотный сигнал, повышает эффективность систем БПЭ [53]. Однако для того, чтобы применять эту особенность многочастотных сигналов, необходимо разрабатывать специальные многочастотные либо широкополосные приемники и передатчики, широкополосные выпрямительные цепи. К примеру, могут быть использованы собственные резонансы высших порядков печатных спиральных катушек [54], но их настройка на желаемые частоты является трудоемкой задачей.

Помимо частотной избирательности может быть использовано мультиплексирование с временным разделением каналов, обычно используемое в телекоммуникационных сетях, с помощью которого в [55] была показана передача энергии к приводам двигателей постоянного тока с целью обеспечения одновременной подачи обмоток якоря и обмоток возбуждения и управления токами в них.

2 Применение метаповерхностей для улучшения характеристик систем БПЭ

2.1 Метаповерхности для управления магнитным полем передатчика

В настоящее время одним из направлений развития систем БПЭ является применение метаповерхностей для повышения эффективности передачи энергии. Подробный обзор современных систем БПЭ использующих метаповерхности можно найти в соответствующих обзорных работах [38,56]. Метаповерхности представляют собой тонкие по сравнению с длиной волны искусственные двумерные структуры, состоящие из периодического массива элементов (мета-атомов) и обладающие необычными, по сравнению с природными материалами, электромагнитными свойствами [57]. Согласно принципу Гюйгенса, можно контролировать поле за пределами метаповерхности с помощью управления касательными к ней составляющими поля, или, что эквивалентно, контролировать распределение электрического и магнитного поверхностных токов. Этого добиваются с помощью тщательного проектирования геометрии мета-атомов, из которых состоит метаповерхность, а также их поляризационных откликов.

Такой способ управления электромагнитными полями с помощью метаповерхностей может быть применен как для дальнего поля, так и для ближнего, что более интересно для магнитно-резонансной передачи энергии. Впервые было экспериментально продемонстрировано повышение эффективности ближнепольной передачи энергии в [58]. С тех пор было предложено множество различных конструкций метаповерхностей для повышения эффективности передачи энергии, дальности и устойчивости систем к смещению или повороту приемника относительно передатчика. Системы БПЭ на их основе могут быть разделены на несколько групп в зависимости от взаимного расположения метаповерхности, передающей и приемной катушек. Как показано на

рисунке 5, они могут быть расположены между катушками [58], спереди или сзади каждой из катушек [59], а также по бокам от них [60].

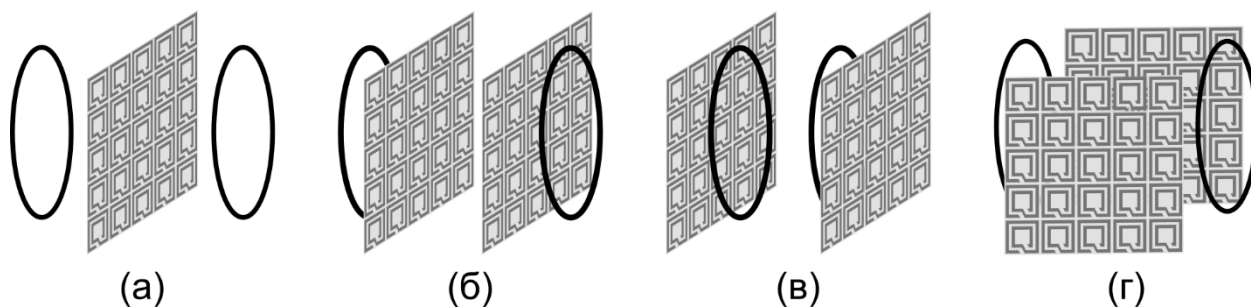


Рисунок 5 – Варианты применения метаповерхностей в системах БПЭ

Большинство работ сосредоточено именно на разработке таких пассивных метаповерхностей, которые служат для управления магнитным полем передатчика и увеличения связи с приемником. Использование таких дополнительных элементов в системах БПЭ значительно увеличивает габариты системы, что является существенным недостатком при практическом использовании и не очень удобно для применения в потребительской электронике.

2.2 Резонаторы на основе метаповерхностей в системах БПЭ

Недавно был предложен иной подход к применению метаповерхностей для улучшения характеристик БПЭ, а именно, использование их непосредственно в качестве излучающего элемента [6]. Основным преимуществом по сравнению со спиральными катушками, используемыми обычно в качестве передатчиков систем БПЭ, является возможность гибкого управления электрическими и магнитными полями за счет изменения дизайна элементарной ячейки метаповерхности и регулирования ее отклика. Таким образом можно добиться равномерного распределения магнитного поля в большой области, с помощью которого возможна одновременная зарядка сразу нескольких электронных устройств. На рисунке 16 (а) показана концепция работы встроенной в офисный стол метаповерхности, которая без проводов заряжает все мобильные устройства, которые размещены на столе. Концептуальная иллюстрация

работы такой системы показана рисунке 6 (б), на котором изображена излучающая метаповерхность, непосредственно к которой подается возбуждающий сигнал, и она начинает создавать вокруг себя магнитное поле, обозначенное белыми линиями. На ее поверхности располагаются приемники, которые пронизывает это магнитное поле и возбуждает в них токи, которые можно использовать затем для питания нагрузки. То есть, по сути, предложенная концепция является системой БПЭ «один ко многим», в которой в качестве излучающего элемента используется не стандартная спиральная планарная катушка, а метаповерхность.

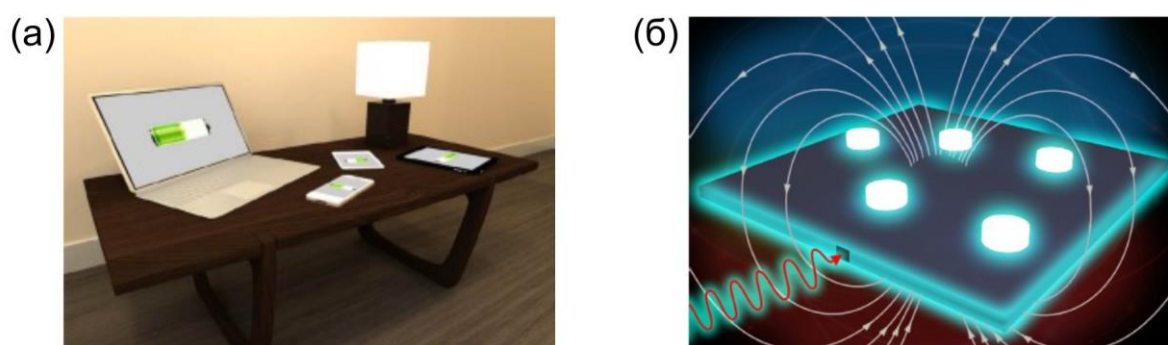


Рисунок 6 – Концептуальное изображение системы с излучающей метаповерхностью: а) встроенная в столешницу метаповерхность питает одновременно несколько устройств [6]; б) принцип работы излучателя на основе метаповерхности [8]

Ранее также были предложены некоторые варианты реализации подобных систем, а именно резонатор из массива параллельных проводов, нагруженных на конденсаторы [7], схематично показанный на рисунке 7 (а) слева, а также резонатор из двух слоев проводов, расположенных перпендикулярно друг другу и погруженных в воду [8], который изображен на рисунке 7 (б) слева. Справа на обоих рисунках показано создаваемое резонаторами нормированное распределение нормальной компоненты магнитного поля на высоте 30 мм от их поверхности.

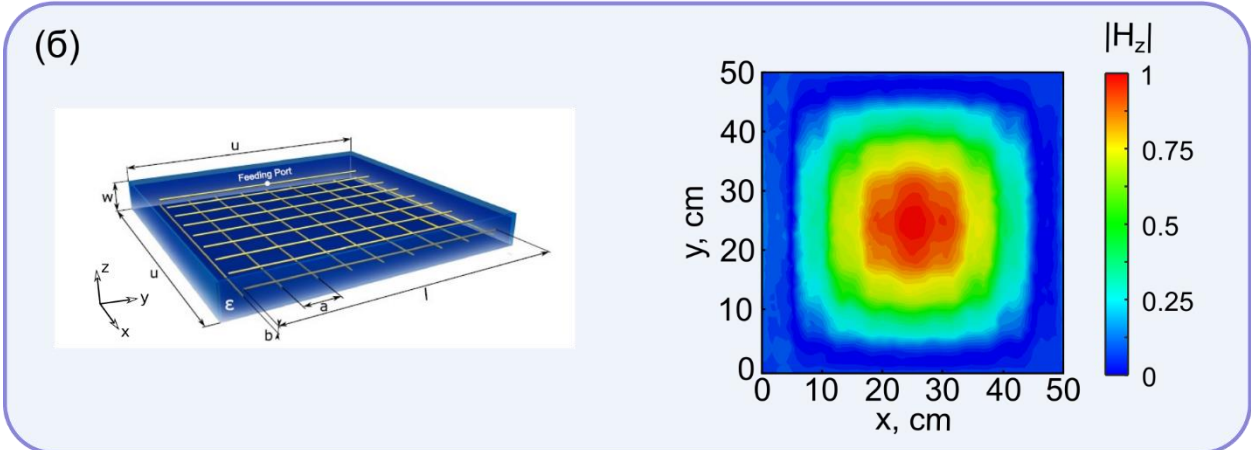
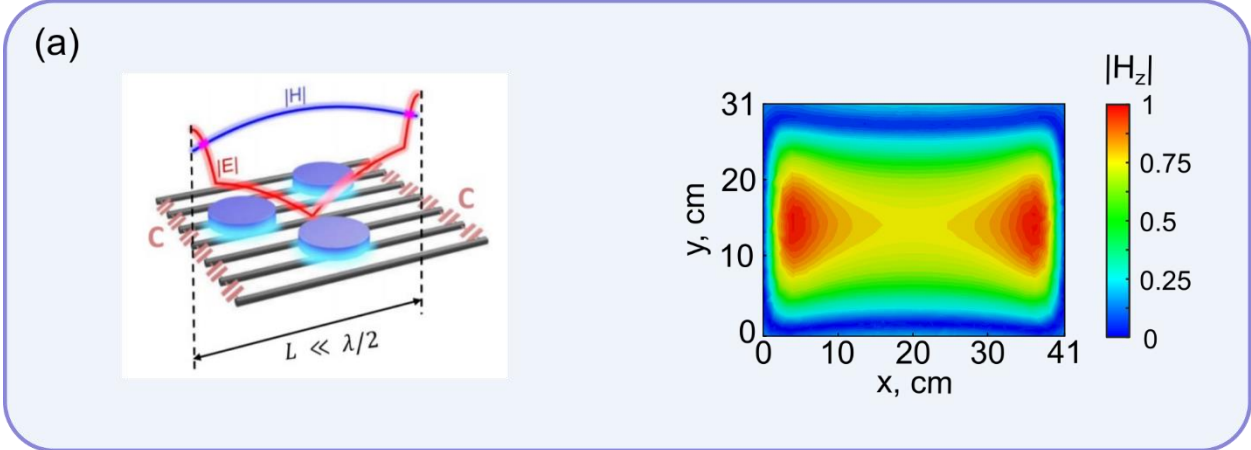


Рисунок 7 – Резонаторы на основе метаповерхности и создаваемое ими распределение нормальной компоненты магнитного поля: а) Резонатор из проводов нагруженных на емкости [7]; б) резонатор из перекрещенных проводов погруженных в воду [8]

Предложенные конструкции обладают рядом достоинств, например первая конструкция отличается простотой изготовления, поскольку реализована с применением технологии производства печатных плат, равномерным распределением магнитного поля, которое, однако, имеет максимум на краях структуры. Достоинством второй модели является низкий уровень удельного коэффициента поглощения электромагнитной энергии, который обеспечивает безопасность для человека, однако имеет относительно небольшую область с магнитным полем большой интенсивности, что приводит к снижению эффективности передачи при размещении приемника далеко от центра.

3 Разработка и численное исследование гибридного резонатора на основе метаповерхности

Как было показано в представленном выше обзоре литературы, применение различных метаповерхностей и резонаторов на их основе для улучшения устойчивости и эффективности систем БПЭ является перспективным направлением научных и инженерных исследований. Как было отмечено, с их помощью можно добиться снижения удельного коэффициента поглощения электромагнитной энергии, а также получить с помощью одного передатчика равномерное распределение магнитного поля в большой области, в которой могут быть расположены несколько заряжаемых устройств одновременно. Однако, предложенные ранее конструкции обладают рядом существенных недостатков, которые необходимо устранить, для того чтобы приблизить их практическое применение в системах БПЭ.

Основная идея данной работы – объединить простоту и технологичность изготовления резонатора из параллельных проводов, нагруженных на ёмкости, с равномерным полем и низким SAR резонатора из перекрещенных проводов, погруженных в воду. Для этой цели предлагается заменить жидкий диэлектрик с высокой проницаемостью ϵ на другой, более практичный, твердый диэлектрик, а также применить идею гибридных резонаторов, в которых не весь объем резонатора заполняется диэлектриком, а только его часть, для повышения однородности поля.

В данной главе будет предложена конструкция гибридного резонатора на основе метаповерхности для использования в качестве передатчика в системах БПЭ, а затем численно исследованы ее характеристики. Численное моделирование будет выполняться в программном пакете CST Microwave Studio 2017, в котором для анализа будут применены методы собственных мод, а также конечного интегрирования в частотной области.

3.1 Дизайн резонатора и принцип работы

На рисунке 8 показана геометрия предлагаемого гибридного резонатора, который представляет собой структуру из двух ортогонально расположенных слоев параллельных печатных проводников длины L и ширины w , расположенных на расстоянии s_i друг от друга, много меньшем длины волны. В углах конструкции располагаются квадратные диэлектрические вставки шириной d , с диэлектрической проницаемостью ε . Расстояние между слоями, а также высота вставок – h .

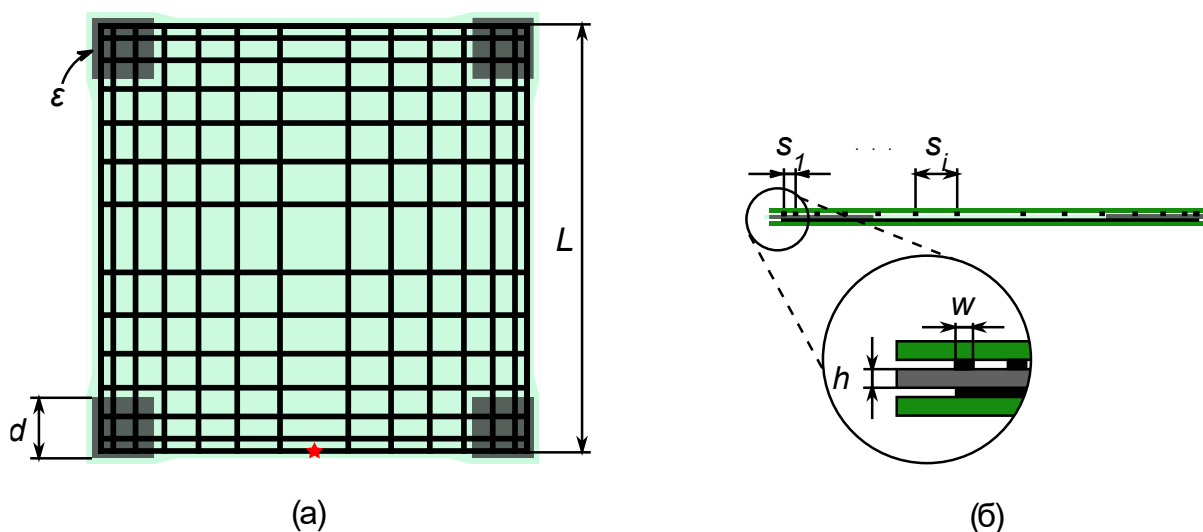


Рисунок 8 – Геометрия резонатора: а) вид сверху; б) вид сбоку

За счет того, что проводники в каждом из слоев располагаются на расстоянии много меньшем длины волны, между ними возникает сильная взаимная связь, в результате чего резонанс одиночного провода расщепляется на несколько частот, которые соответствуют собственным модам образовавшегося резонатора. Если при этом добавить второй слой проводов, ориентированных перпендикулярно проводам первого слоя и расположить их близко к нему, то возникнет сильная электрическая связь между слоями, которая дополнительно будет усиливаться за счет высокой диэлектрической проницаемости керамических вставок, расположенных между слоями. Это позволит сконцентрировать электрическое поле между этими слоями.

На рисунке 8 (а) красной звездой обозначена точка питания, которая располагается в разрезе нижнего крайнего проводника одного из слоев структуры. При возбуждении структуры в питающем проводнике начинает протекать ток, а за счет того что проводники в одном слое оказываются сильно связанными за счет их расположения на расстоянии сильно меньшем длины волны, в остальных проводниках начинают наводиться токи, при этом их амплитуда оказывается почти того же порядка. Возбуждение второго слоя происходит из-за электрической связи между проводниками различных слоев, таким образом и во втором слое начинает течь ток, то есть токи разных слоев замыкаются друг с другом за счет токов смещения.

Конфигурация токов будет зависеть от частоты возбуждающего сигнала. Как будет показано в главе, посвященной анализу собственных мод структуры, возможно такое их распределение, при котором над всей поверхностью резонатора возбуждается однородное магнитное поле, которое можно применить для БПЭ, причем эффективность передачи не будет зависеть от расположения приемника на передатчике, что невозможно в стандартных системах магнитно-резонансной передачи энергии.

3.2 Анализ собственных мод

В первую очередь, для предложенной структуры были проанализированы собственные моды для того, чтобы определить ту моду, на которой создается равномерное распределение нормальной компоненты магнитного поля над поверхностью резонатора. В результате численного расчета с помощью метода собственных мод были получены карты распределения напряженности магнитного поля для первых восьми мод, которые показаны на рисунке 9.

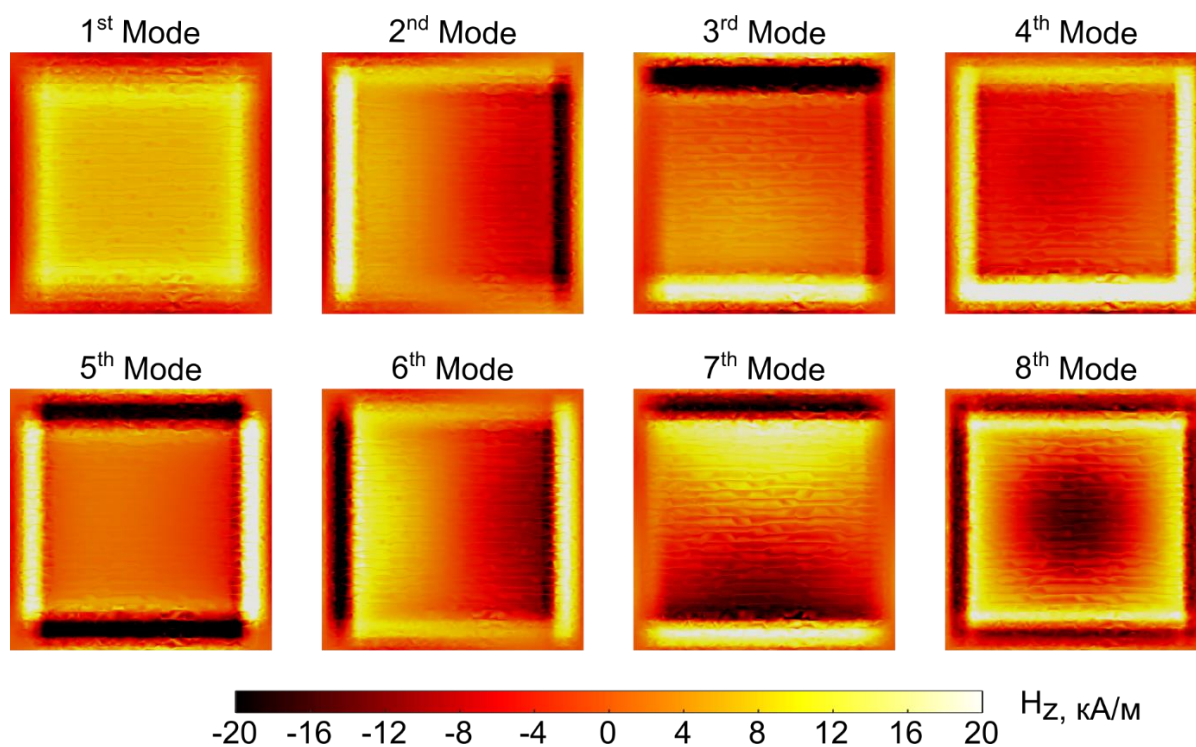


Рисунок 9 – Распределения нормальной компоненты магнитного поля на высоте 30 мм от резонатора для первых 8 собственных мод структуры

На рисунке видно, что на фундаментальной моде нормальная компонента H_z поля имеет равномерно высокую амплитуду над большей частью поверхности резонатора, в то время как на более высоких модах максимум H_z находится ближе к его краям, а так же существуют области, в которых напряженность равняется 0. Поскольку для эффективной БПЭ в системе «один-многим» необходимо, чтобы все приемники возбуждались одинаково хорошо, для этого нужно чтобы каждый из них пронизывал одинаковый магнитный поток в каком бы месте на передатчике они ни находились. Из этих соображений в качестве рабочей была выбрана именно первая мода резонатора. Минимум поля в центре структуры делает невозможным БПЭ на более высоких модах для приемников, параллельных плоскости резонатора.

Стоит, однако, отметить, что высшие моды все же могут быть использованы для БПЭ при некоторых сценариях работы. Например, они могут питать приемники (планарные катушки), расположенных в плоскостях Oxz и Oyz , аналогично тому как было предложено в [7], поскольку на этих модах возбуждаются H_x и H_y компоненты поля, как видно из рисунка 10. Если приемник будет

располагаться в плоскости Oyz в центре резонатора, то при возбуждении второй моды, в нем будет наводиться ток, питающий нагрузку, и основной вклад в передачу энергии будет вноситься компонентой H_x магнитного поля. При этом, если возбуждать первую или третью моду, то такой приемник не будет пронизываться полем и эффективность передачи энергии будет равна 0. Аналогичным образом, с помощью третьей моды можно питать приемник, расположенный в плоскости Oxz . Эта особенность распределения магнитного поля на различных модах может быть использована для БПЭ к произвольно ориентированным приемникам, если в резонаторе будут возбуждаться сразу 3 моды одновременно. В таком случае, вне зависимости от угла наклона приемника по любой из трех осей, его будет пронизывать магнитный поток и осуществляться БПЭ, однако для этого потребуется использовать многочастотные приемники и согласующие цепи, чтобы эффективно принимать энергию на каждой из трех частот.

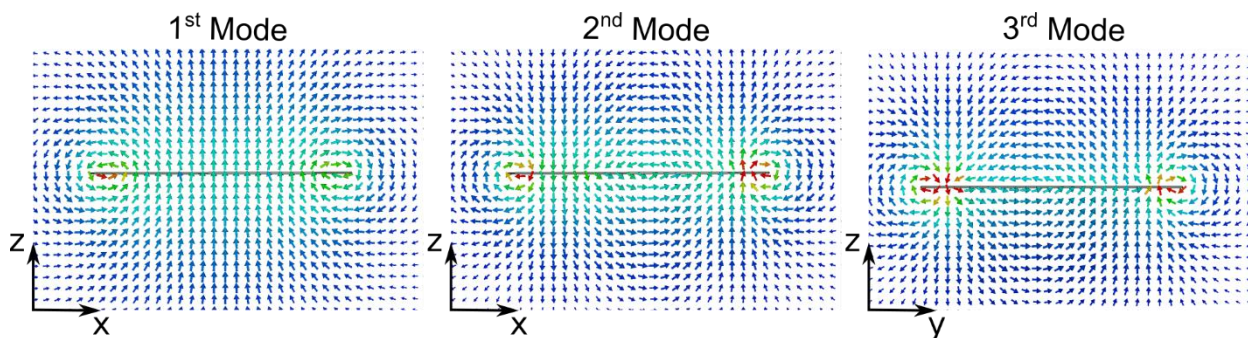


Рисунок 10 – Распределение вектора напряженности магнитного поля H первых трех мод в поперечной плоскости резонатора

Поскольку данная работа нацелена на разработку системы устойчивой к относительному расположению приемника на передатчике, при этом приемник всегда должен располагаться параллельно плоскости резонатора, мы остановимся на исследовании только первой моды резонатора. Для этого была проанализирована зависимость ее частоты от ширины диэлектрических вставок, значения их диэлектрической проницаемости, высоты между слоями проводников и количества проводников в каждом из них. На рисунке 11 показаны графики зависимостей частоты первой моды от перечисленных параметров.

Для построения каждой из зависимостей, некоторые параметры были зафиксированы, а именно: длина проводников $L = 380$ мм; для графика, показанного на рисунке 11 (а) также была зафиксирована высота между слоями $h = 2$ мм и количество проводников в каждом слое $N = 30$; для рисунков 11 (б) и 11 (в) высота между слоями проводников $h = 2$ мм и проницаемость вставок $\varepsilon = 45$; для рисунка 10 (г) были зафиксированы параметры диэлектрических вставок ($d = 50$, $\varepsilon = 45$).

Как видно из графиков, изменяя геометрические размеры резонатора (рисунок 11 (б-г)), мы можем регулировать в небольших пределах его рабочую частоту. Наиболее значимый параметр для регулировки частоты – диэлектрическая проницаемость вставок в углах структуры. С ее помощью, как видно по рисунку 11 (а), мы можем регулировать рабочую частоту в очень большом диапазоне, и даже снизить ее вплоть до 5 МГц.

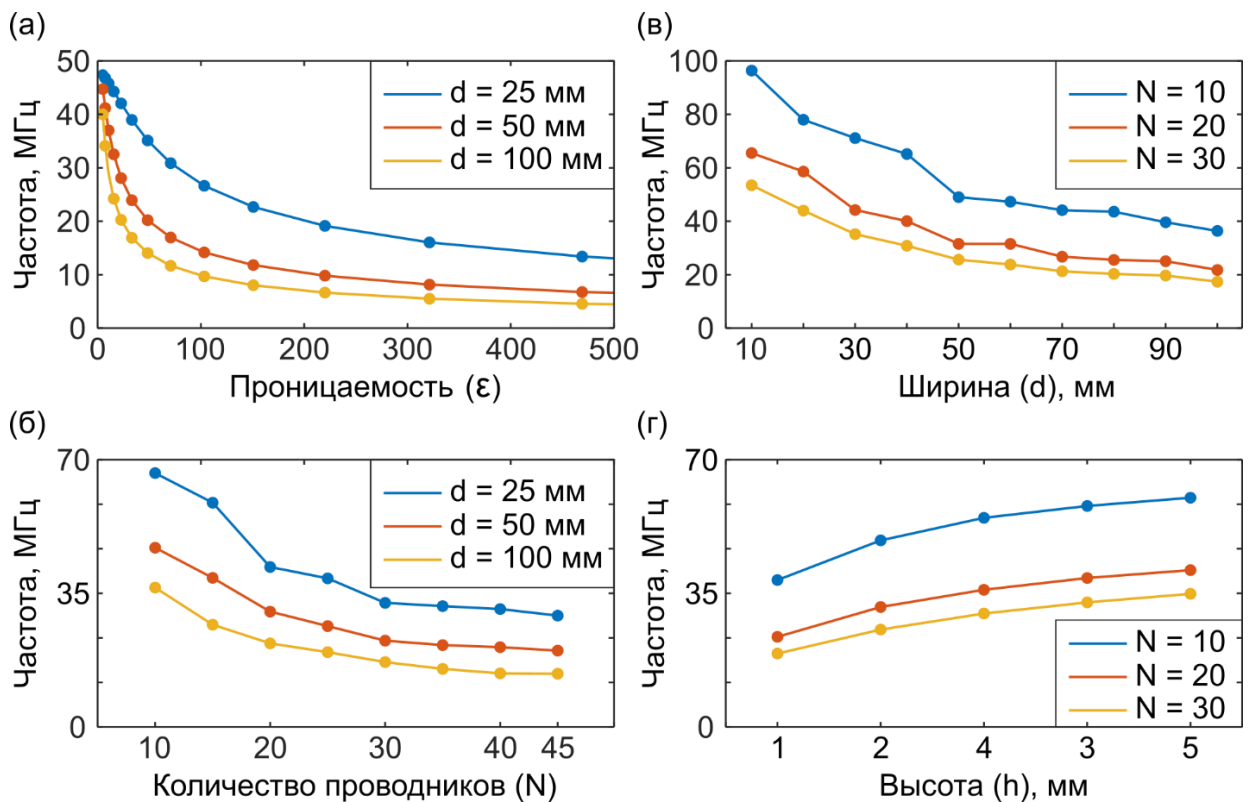


Рисунок 11 – Графики зависимости частоты первой моды резонатора: а) от диэлектрической проницаемости вставок при их различных размерах; б) от количества проводников в каждом слое при различных размерах вставок; в) от размера диэлектрических вставок при различном количестве проводников в каждом слое; г) от высоты между слоями проводников при их различном количестве в каждом из слоев

В настоящее время существует два общепринятых стандарта БПЭ, а именно Qi и AirFuel, которые регламентируют основные технические характеристики систем БПЭ и, в частности, их рабочие частоты. Для стандарта Qi это 110–205 кГц, для AirFuel – 6,78 МГц. Для работы систем БПЭ также могут быть использованы и другие, открытые для индустриального, научного и медицинского применения, диапазоны частот, а именно 13,56 МГц, 27 МГц, то есть удвоенная и утроенная частота стандарта AirFuel. Как видно по рисунку 11 (а), для предложенной конструкции резонатора невозможно обеспечить работу на частотах стандарта Qi, поскольку для этого потребовалась бы колоссальная диэлектрическая проницаемость. Для обеспечения работы в диапазоне стандарта AirFuel необходимо использовать диэлектрические вставки с проницаемостью порядка нескольких сотен. Из-за этого в качестве рабочей была выбрана частота 27 МГц, поскольку изготовление диэлектрика с необходимой проницаемостью для этой частоты намного дешевле и проще, что важно для практического применения.

3.3 Оптимизация резонансной частоты и распределения поля

Для возбуждения собственных мод резонатора, рассчитанных в прошлом подразделе, и дальнейшего численного изучения его характеристик, таких как входной импеданс, добротность, распределения электрического и магнитного полей и анализа потерь, был использован метод конечного интегрирования в частотной области. Для возбуждения численной модели структуры был использован дискретный порт с волновым сопротивлением 50 Ом, который располагался в разрезе крайнего проводника в одном из двух слоев резонатора (как обозначено на рисунке 8 (а) с помощью красной звезды).

Ориентируясь на результаты параметрического анализа, представленные на рисунке 11, а также на технологические возможности изготовления составных частей резонатора (печатные платы с проводниками, диэлектрические

вставки и т.д.) была проведена первоначальная настройка резонатора на рабочую частоту. На рисунке 12 (а) показана геометрия резонатора после настройки его на частоту 27 МГц. На рисунке 12 (б) представлен график частотной зависимости входной проводимости резонатора на основной моде. Ненагруженная добротность для этой структуры, рассчитанная по этому графику, составила $Q = 310$.

Требуемая резонансная частота была достигнута при следующих параметрах модели: длина проводников $L = 380$ мм, ширина диэлектрических вставок $d = 80$ мм, их диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 55$, тангенс угла потерь был принят равным $\tan(\delta) = 10^{-4}$, что соответствует потерям в современных высокочастотных диэлектриках. Количество проводников $N = 30$, которые расположены на равном друг от друга расстоянии $s = 7$ мм, ширина проводников $w = 2$ мм.

Затем было построено распределение модуля нормальной компоненты магнитного поля в плоскости 30 мм над резонатором и нормировано к максимальному значению 9 А/м. Полученное распределение показано на рисунке 12 (в). Также на рисунке 12 (г) показана амплитуда поля в диагональном сечении вдоль белой пунктирной линии на рисунке 12 (в). По полученным графикам видно, что поле над поверхностью резонатора не однородно и имеет заметное снижение амплитуды в центре структуры, которое составляет 30 % от максимального значения.

Подобная проблема неравномерности магнитного поля часто имеет место для передатчиков большого размера. Ранее было предложено несколько способов решения этой проблемы для спиральных катушек. Например, в [61] было применено неравномерное распределение витков катушки, в результате которого добивались более однородного поля, а в [62] было предложено использовать дополнительную резонансную катушку, которая возбуждается основной катушкой и создает дополнительное магнитное поле, в результате чего их суммарное распределение становится более однородным.

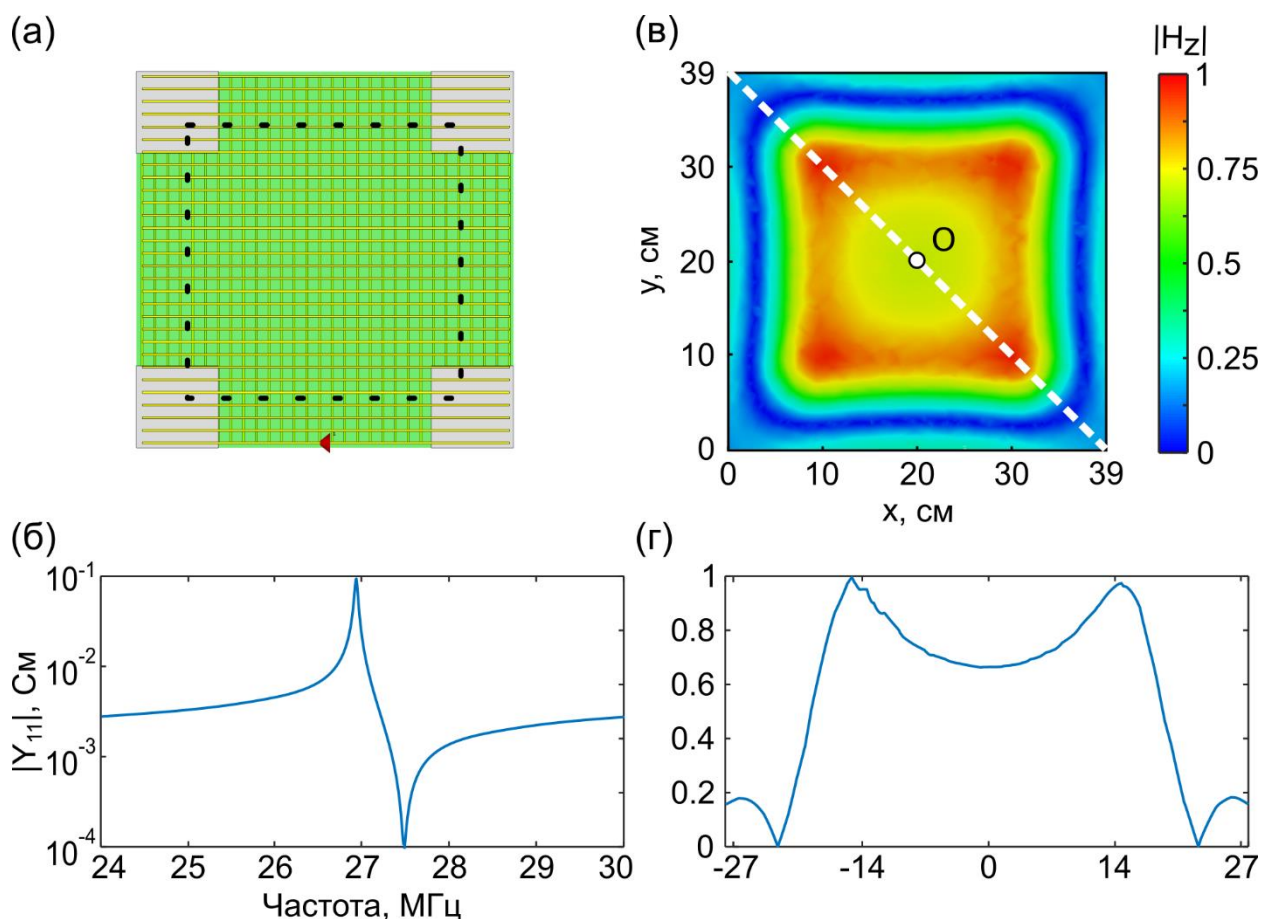


Рисунок 12 – Гибридный резонатор, настроенный на 27 МГц: а) вид сверху; б) модуль входной проводимости вблизи первой моды; в) цветовая карта распределения напряженности магнитного поля на высоте 30 мм; г) амплитуда напряженности магнитного поля вдоль белой пунктирной линии на рисунке (в)

С целью увеличить амплитуду поля в центре структуры и сделать распределение более равномерным, в данной работе было решено применить принцип неравномерно распределенных проводников [61]. Применение такого же способа оптимизации, что и в работе [61] для предлагаемой структуры оправдано тем, что распределение токов в резонаторе на рабочей частоте соответствует их распределению в спиральной катушке, таким образом, способ увеличения однородности поля с помощью изменения пространственного расположения этих проводников можно использовать и в нашем случае, поскольку протекание токов в обоих случаях эквивалентно. Использование дополнительных резонансных катушек привело бы к обозначенным ранее про-

блемам, которые присущи традиционным системам БПЭ с планарными спиральными катушками в качестве передатчика, как, например, высокий коэффициент удельного поглощения электромагнитной энергии.

Для количественной оценки неоднородности поля в определенной области был введен параметр коэффициент вариации, который определяется как отношение среднеквадратического отклонения (*СКО*) напряженности магнитного поля в этой области к его среднему значению:

$$CoV = \frac{СКО}{Среднее} = \frac{\sigma}{\mu}. \quad (16)$$

Таким образом, с помощью формулы (16) мы получаем безразмерную величину, характеризующую неравномерность распределения магнитного поля в определенной области резонатора. Чем меньше значение коэффициента вариации, тем амплитуда поля распределена более равномерно. Определим рабочую область резонатора как половину его общей площади, как показано пунктирной линией на рисунке 12 (а). Коэффициент вариации, определенный по формуле (16), для этой модели резонатора в рабочей области составил 15,2 %.

Затем была проведена оптимизация распределения проводников, целью которой было уменьшение коэффициента вариации амплитуды магнитного поля в рабочей области резонатора. Для этого m крайних проводников были распределены эквидистантно, а следующие p проводников по закону, предложенному в [61]. Расстояние s_i между двумя соседними проводниками определялось следующим образом:

$$s_i = L(f_i - f_{i+1}), \quad (17)$$

где L – длина проводников,
 f_i – отношение между i -м проводником считая от края структуры к длине проводника, определяемое по следующей формуле:

$$f_i = \left(1 - \frac{N - i + 1}{N}\right)^k, \quad (18)$$

где N – общее число проводников,
 k – коэффициент распределения проводников.

В результате оптимизации общего количества проводников N , коэффициента распределения проводников k , а также числа эквидистантно распределенных проводников m была получена оптимизированная модель резонатора, представленная на рисунке 13 (а). Последующая настройка резонансной частоты на 27 МГц была произведена за счет изменения размеров диэлектрических вставок и их диэлектрической проницаемости. В итоге, оптимизированная модель имеет следующие параметры: длина и ширина проводников осталась прежней ($L = 380$ мм, $w = 2$ мм), ширина диэлектрических вставок $d = 54$ мм, их диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 45$, количество проводников было оптимизировано и теперь составляет $N = 34$ в каждом из слоев, при этом, первые $m = 12$ расположены на равном расстоянии $s = 7,5$ мм друг от друга, а оставшиеся $p = 5$, по формуле (17) с коэффициентом распределения $k = 0,28$. На рисунке 13 (б) представлен график частотной зависимости входной проводимости оптимизированного резонатора на основной моде, по которому была рассчитана ненагруженная добротность, которая составила $Q = 200$. Небольшое уменьшение добротности резонатора компенсируется значительно возросшей однородностью. На рисунке 13 (в) показано распределение нормальной компоненты магнитного поля в плоскости 30 мм над резонатором, нормированное к максимальному значению 7,8 А/м, при этом амплитуда в диагональном сечении резонатора показана на рисунке 13 (в). Также на нем для сравнения показано распределение амплитуды до оптимизации. По полученным графикам видно, что снижение амплитуды в центре структуры достигает 20 %, то есть на 10 % меньше, чем для неоптимизированного случая. Коэффи-

коэффициент вариации для оптимизированного резонатора в рабочей области (обозначена пунктирной линией на рисунке 13 (а)), рассчитанный по формуле (16), составляет 6,6 %.

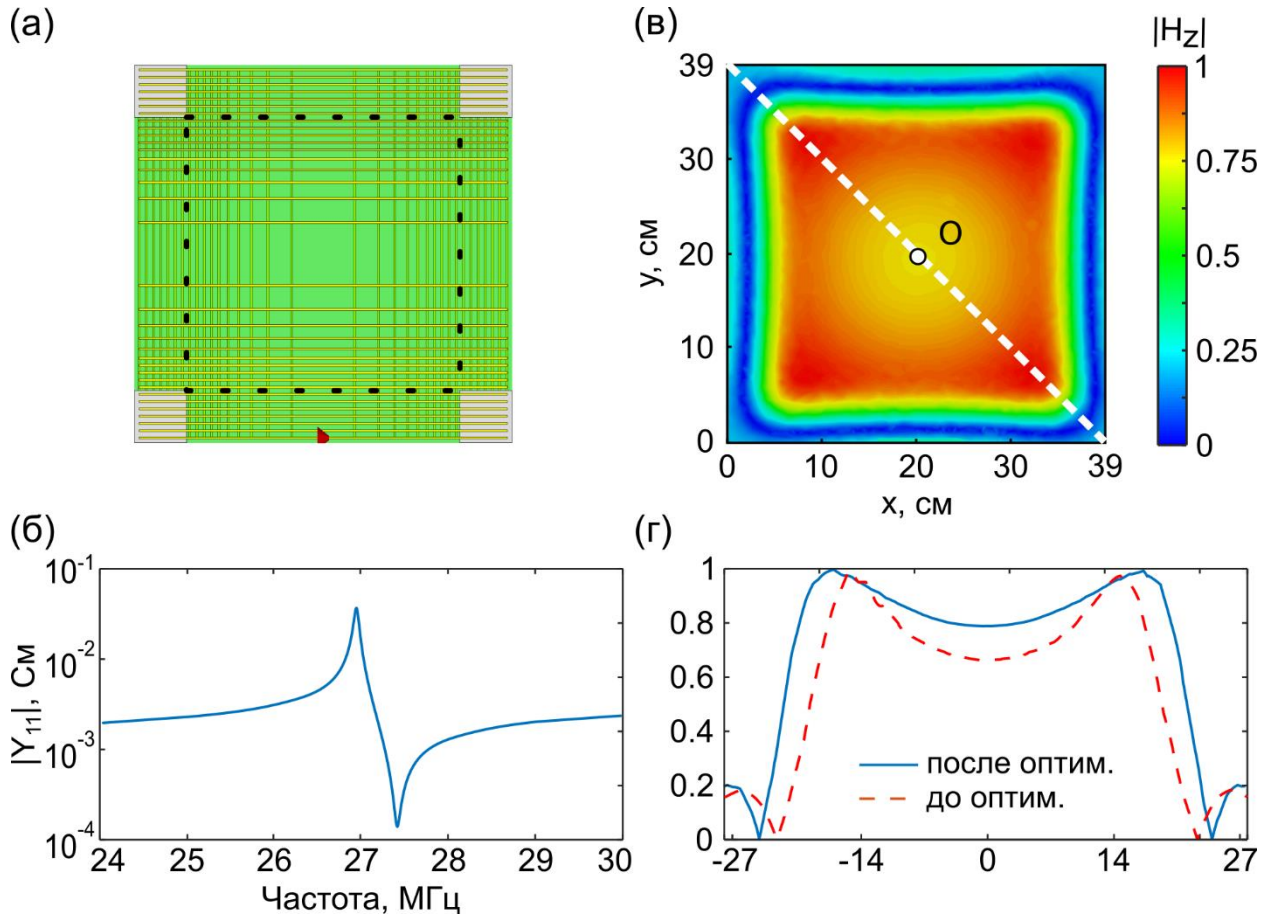


Рисунок 13 – Гибридный резонатор, настроенный на 27 МГц: а) вид сверху; б) модуль входной проводимости вблизи первой моды; в) цветовая карта распределения напряженности магнитного поля на высоте 30 мм; г) амплитуда напряженности магнитного поля вдоль белой пунктирной линии на рисунке (в)

3.4 Эффективность беспроводной передачи энергии

Для численного расчета эффективности БПЭ было проведено моделирование гибридного резонатора при наличии приемника. Для последующего корректного сравнения эффективности предлагаемой конструкции с предыдущими работами [7,8], была использована аналогичная конфигурация модели,

а именно, на высоте 15 мм от резонатора в центре размещалась нерезонансная рамочная антенна размерами 9×6 см, выполненная из медного провода диаметра 1 мм. На рисунке 14 (а) показана модель для численного моделирования, выполненная в программе CST Microwave Studio. Для расчёта эффективности были использованы два метода, которые дали одинаковый результат, первый из которых заключался в вычислении максимальной эффективности по формуле (10), при выполнении условий из формул (11) и (12), второй, заключался в подключении согласующих цепей к входному и выходному портам системы в схемотехническом редакторе и последующей оценке эффективности как квадрата модуля коэффициента передачи. По сути, оба метода являются эквивалентными, потому что в каждом из них мы добиваемся прохождения сигнала от источника к нагрузке без отражений. На рисунке 14 (б) изображена использованная для согласования цепочка с указанием номиналов элементов, рассчитанных для согласования на рабочую частоту 27 МГц. Получившиеся после подключения этой цепи к системе S-параметры показаны на рисунке 14 (в). Как можно видеть, максимум коэффициента передачи достигается на частоте 27 МГц и составляет $s_{21} = 0,944$, таким образом, эффективность системы после согласования составляет $\eta = |s_{21}|^2 = 89 \%$. После расчета эффективности был проведен анализ источников потерь в системе, и на рисунке 14 (г) показан вклад диэлектрических потерь, потерь в металлических проводниках, а также на излучение. Как видно по графику, более половины всех потерь занимают резистивные потери в проводниках, 3,6 % энергии теряется в диэлектриках, а наименьший вклад в уменьшение эффективности вносят потери на излучение, а именно 1,6 %.

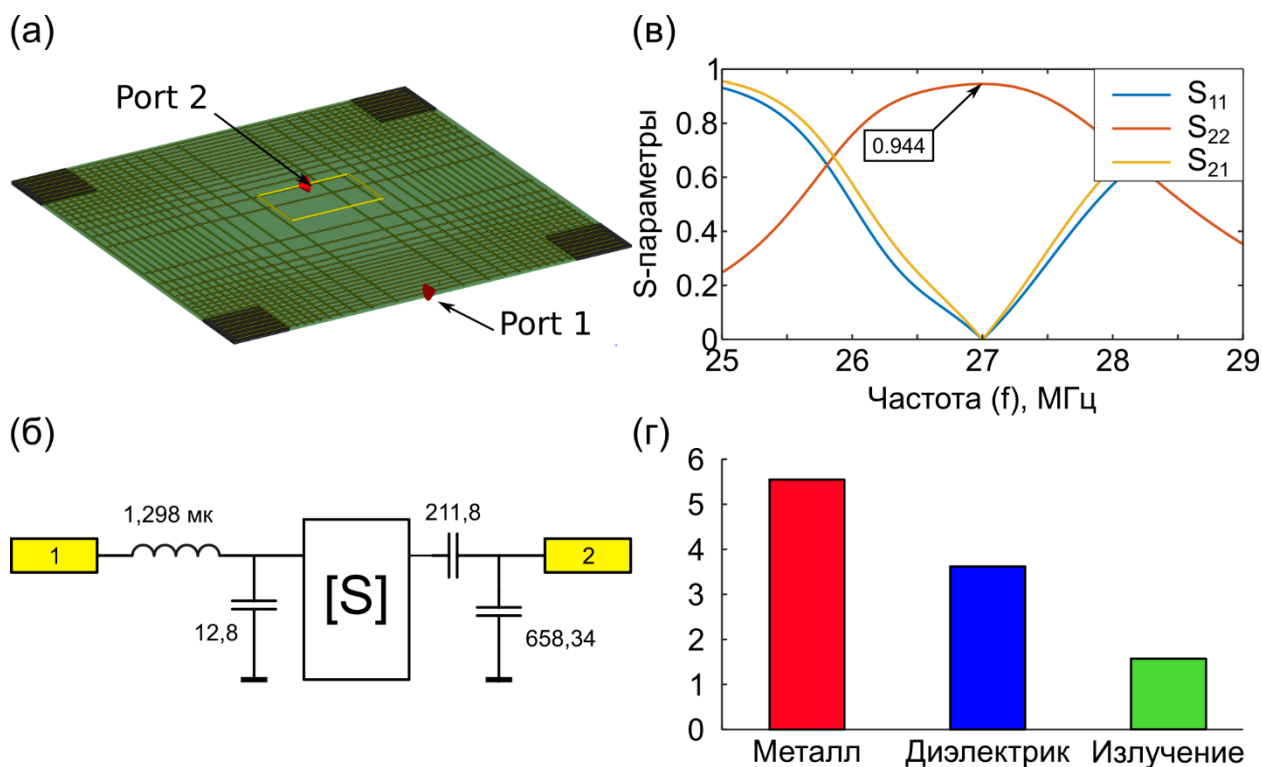


Рисунок 14 – Эффективность БПЭ: а) модель для численного расчета эффективности; б) рассчитанная согласующая цепочка; в) S-параметры системы после согласования; г) сравнение вклада различных источников потерь на эффективность

3.5 Электрическое поле резонатора и радиочастотная безопасность

Как было показано в разделе 1.3, одним из факторов, который ограничивает максимально допустимую для передачи системой БПЭ мощность, является коэффициент удельного поглощения электромагнитной энергии (SAR), который характеризует энергию электромагнитного поля, поглощаемую тканями тела человека. Согласно формуле (15), SAR прямо пропорционален квадрату напряженности электрического поля, следовательно, для повышения безопасности систем БПЭ необходимо добиться снижения напряженности электрического поля в тех областях, где будут располагаться биологические объекты. В связи с этим, помимо магнитного поля, его распределения и напряженности, также необходимо изучить электрическое поле, возникающее при работе резонатора. На рисунке 15 (а) показано распределение электрического

поля в диагональном сечении резонатора, на рисунке 15 (б) показано электрическое поле в плоскости Oxy между слоями проводников резонатора.

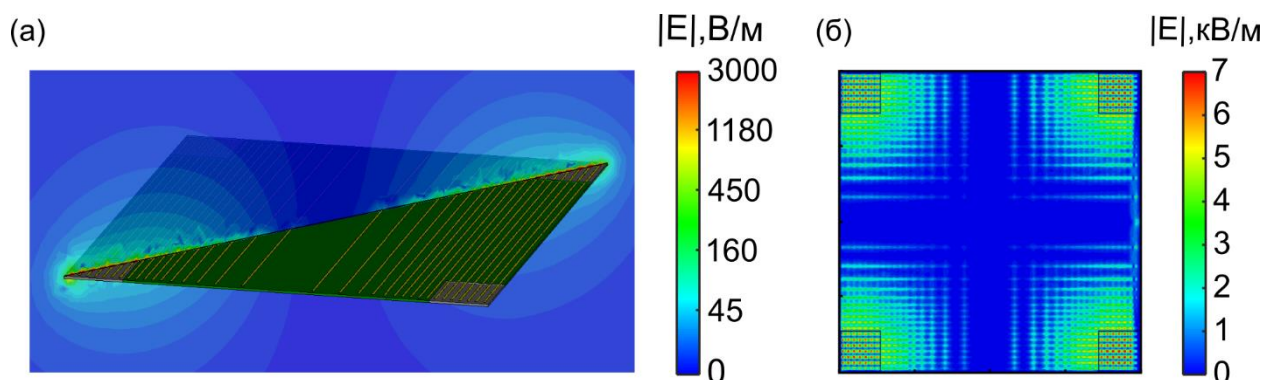


Рисунок 15 – Электрическое поле резонатора: а) в диагональном сечении; б) в продольной плоскости между слоями проводников

Как видно по рисунку, максимум электрического поля находится ближе к углам структуры, и в основном сконцентрировано между слоями проводников. Лишь малая часть электрического поля выходит за пределы резонатора.

Затем была проведена численная оценка уровня SAR в присутствии биологических тканей над гибридным резонатором. Для этого была создана соответствующая модель, содержащая нерезонансный приемник, расположенный в центре резонатора на высоте 15 мм, а также воксельная модель предплечья человека, расположенную на той же высоте на краю метаповерхности, в области расположения керамических вставок, то есть там, где сосредоточена большая часть электрического поля. Таким образом, нами был рассмотрен худший возможный сценарий. Модель предплечья была взята из электродинамической модели тела человека (VNP-Female CAD Model), содержащей детализированные ткани и органы с характерными для них электромагнитными параметрами.

Резонатор и приемник были согласованы с помощью настройки импедансов портов системы таким образом, чтобы выполнялось условие формул (11) и (12), то есть так чтобы входной импеданс резонатора равнялся комплексно сопряженному импедансу порта источника сигнала, а импеданс при-

емника – комплексно сопряженному импедансу нагрузки. При этом обеспечивается максимальная мощность в нагрузке, что наиболее близко к реальному сценарию работы системы БПЭ.

На рисунке 16 (а) показана описанная расчетная модель, а также результат вычисления SAR , при котором использовалось усреднение по 10 граммам тканей, а входная мощность составляла 1 Вт. Как видно по рисунку, максимальное значение SAR составляет 11 мВт/кг. Как было показано в таблице 1, предельное значение SAR в конечностях, в соответствии со всеми приведенными в ней для сравнения стандартами, составляют 4 Вт/кг, таким образом, с помощью гибридного резонатора можно передавать до 350 Вт мощности, и при этом не будет причинён существенный вред человеку, находящемуся в непосредственной близости от него.

Также было проведено сравнение с предложенными ранее моделями резонаторов на основе метаповерхностей и с традиционно использующейся в качестве передатчика систем БПЭ планарной спиральной катушкой. Результаты расчета SAR для которых представлены на рисунках 16 (б-г).

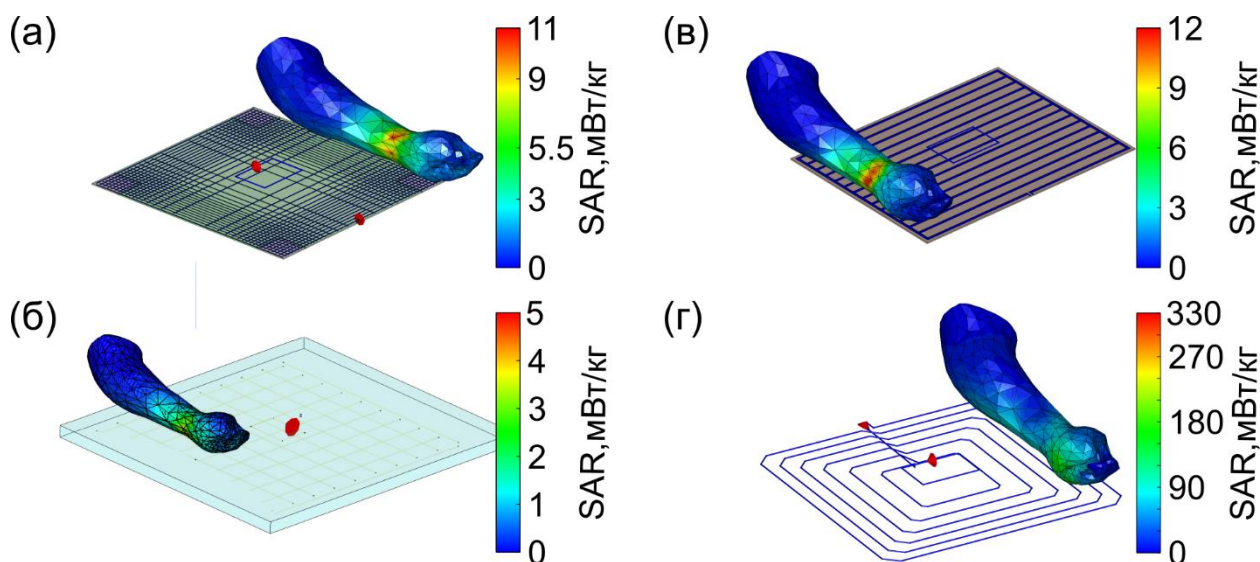


Рисунок 16 – Результат численной оценки SAR для передатчиков систем БПЭ: а) предложенный в этой работе гибридный резонатор; б) резонатор из перекрещенных проводов, погруженных в воду; в) резонатор из проводов, нагруженных на емкости; г) планарная спиральная катушка

Для каждого из расчётов использовались одинаковые условия, то есть в центре, над передатчиком, располагался согласованный приемник, место для

расположения модели руки человека выбиралось по расположению максимума электрического поля, таким образом, рассматривался наихудший случай. Расстояние от передатчика до приемника и модели руки составляло 15 мм. Модель спиральной катушки (рисунок 16 (г)) была выполнена следующим образом: ее размеры соответствуют размерам предлагаемого в данной работе гибридного резонатора и составляют 38×38 см, количество витков выбиралось таким образом, чтобы магнитное поле над катушкой имело один максимум на рабочей частоте 27 МГц, что достигается при 6 витках.

Как видно по рисунку 16 (в), *SAR* резонатора из проводов, нагруженных на емкости, чуть больше, чем у предложенного резонатора, и составляет 12 мВт/кг. *SAR* планарной спиральной катушки на порядок превышает *SAR* резонаторов на основе метаповерхности, составляя 330 мВт/кг, в связи с чем его применение для передачи больших мощностей представляет серьезную опасность для людей и других живых объектов, которые могут находиться вблизи, если не предпринимать дополнительных методов снижения напряженности электрического поля. Согласно международным стандартам (представлены в таблице 1) предельная мощность составит всего 14 Вт. Стоит заметить, что *SAR* резонатора из перекрещенных проводов, погруженных в воду, как видно по рисунку 16 (б), более чем в 2 раза меньше, чем у предлагаемого гибридного резонатора. Это связано с тем, что материал с высокой диэлектрической проницаемостью (в данном случае вода) находится не только между слоями проводников, но и над ними, что позволяет концентрировать в нем большую напряженность электрического поля, чем у гибридного резонатора. Несмотря на это, гибридный резонатор остается более предпочтительной конструкцией передатчика из-за технологичности в изготовлении и применимостью на практике по сравнению с резонатором из проводов, погруженных в воду.

4 Изготовление и экспериментальное исследование прототипа резонатора

4.1 Конструкция и изготовление прототипа

Для экспериментального исследования гибридного резонатора и измерения его характеристик был изготовлен прототип устройства. Основываясь на геометрии оптимизированной численной модели резонатора, представленной в главе 3.3, были изготовлены его составные части, показанные на рисунке 17, из которых затем он был собран.

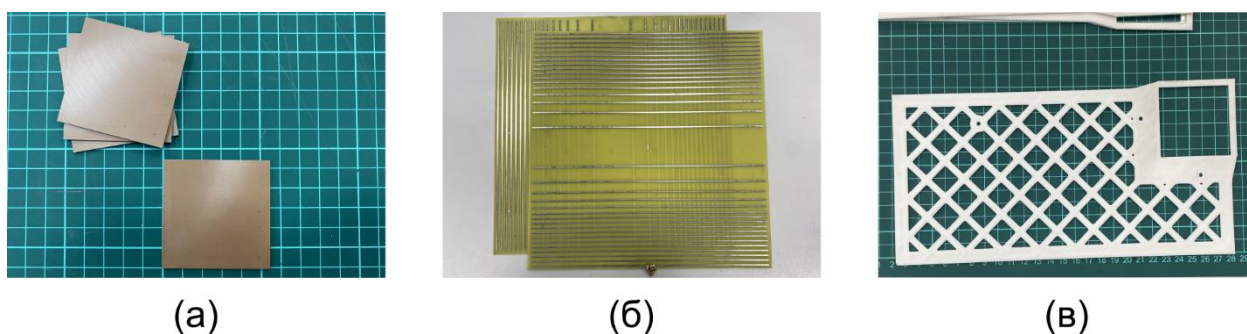


Рисунок 17 – Составные части прототипа резонатора: а) керамические пластины с высокой диэлектрической проницаемостью; б) печатные платы с параллельными проводниками; в) пластиковая прокладка между слоями

В качестве диэлектрических вставок были использованы пластины из высокочастотной керамики размером $54 \times 54 \times 2$ мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 45$, которые были изготовлены по заказу на предприятии ООО «Керамика». Тангенс угла потерь составляет $\tan(\delta) = 10^{-4}$. На рисунке 17 (а) показаны четыре изготовленные пластины.

Два слоя проводников изготовлены с применением технологии производства печатных плат на подложке из фольгированного текстолита FR-4 толщиной 1 мм и показаны на рисунке 17 (б). Общий размер печатных плат составляет 39×39 см. Для подачи питания от источника в разрыв крайнего провода одного из слоев был припаян SMA-коннектор, который также можно увидеть на рисунке 17 (б) внизу.

Для обеспечения механической прочности конструкции, фиксации керамических вставок точно в углах резонатора, а также обеспечения постоянной по всей площади резонатора высоты между слоями, с помощью технологии аддитивной печати из ABS пластика были изготовлены прокладки, выполняющие роль промежуточного слоя, которые показаны на рисунке 17 (в). Все составные части были скреплены друг с другом с помощью полиамидного крепежа: болтов и гаек. Применение пластиковых креплений позволяет не вносить серьезных изменений в распределение электромагнитного поля структуры, в отличие от металлических, и, тем самым, не влиять на параметры структуры. Прототип гибридного резонатора, в собранном из описанных выше составных частей виде, показан ниже, на рисунке 18 (б).

4.2 Стендовые измерения

Для подтверждения результатов, полученных в ходе численного моделирования, а именно равномерного распределения магнитного поля резонатора и эффективности БПЭ, была проведена серия экспериментов, схема которых представлена на рисунке 18 (а). Входной порт гибридного резонатора, через который подается возбуждающий сигнал подключался с помощью коаксиального кабеля к первому входу векторного анализатора цепей. Для измерения распределения магнитного поля над поверхностью резонатора второй порт анализатора подключался к измерительному зонду, который размещался на управляемом 3D позиционере (сканере ближнего поля), с помощью которого в автоматическом режиме проводилось его перемещение над резонатором. На рисунке 18 (б) показана фотография изготовленного прототипа гибридного резонатора, установленного на измерительном стенде. Для получения достоверных результатов измерений было необходимо установить резонатор параллельно осям позиционера, потому что небольшой наклон относительно оси позиционера приводит к искажению получаемого распределения напряженности магнитного поля.

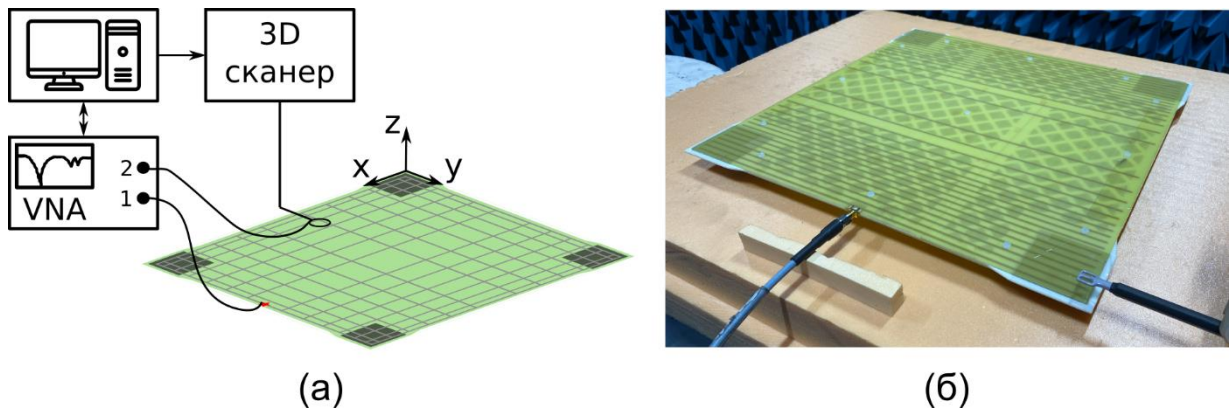


Рисунок 18 – Экспериментальное исследование резонатора: а) схема измерений; б) фотография прототипа гибридного резонатора на измерительном стенде

Были проведены измерения магнитного поля в плоскости параллельной резонатору на высоте 30 мм, а также в поперечной плоскости, проходящей через его центр, результаты которых представлены на рисунках 19 (а, б). Также для сравнения, на рисунках 19 (в) и 19 (г) показано распределение, полученное в результате численного моделирования. Все графики, представленные на рисунках, были нормированы к максимальному значению напряженности магнитного поля. Как можно видеть, экспериментально полученные данные, хорошо соответствуют численным расчётам, и подтверждают равномерное распределение магнитного поля над поверхностью резонатора. Был произведен расчёт коэффициента вариации напряженности поля по формуле (16) для численной оценки неоднородности и сравнения с результатами моделирования. Экспериментально измеренный CoV составляет 4 %. Таким образом, можно сделать вывод, что распределение поля предложенной конструкции резонатора, как и было предсказано в моделировании, обладает высокой однородностью магнитного поля, что делает его перспективным для применения в системах БПЭ «один-ко-многим».

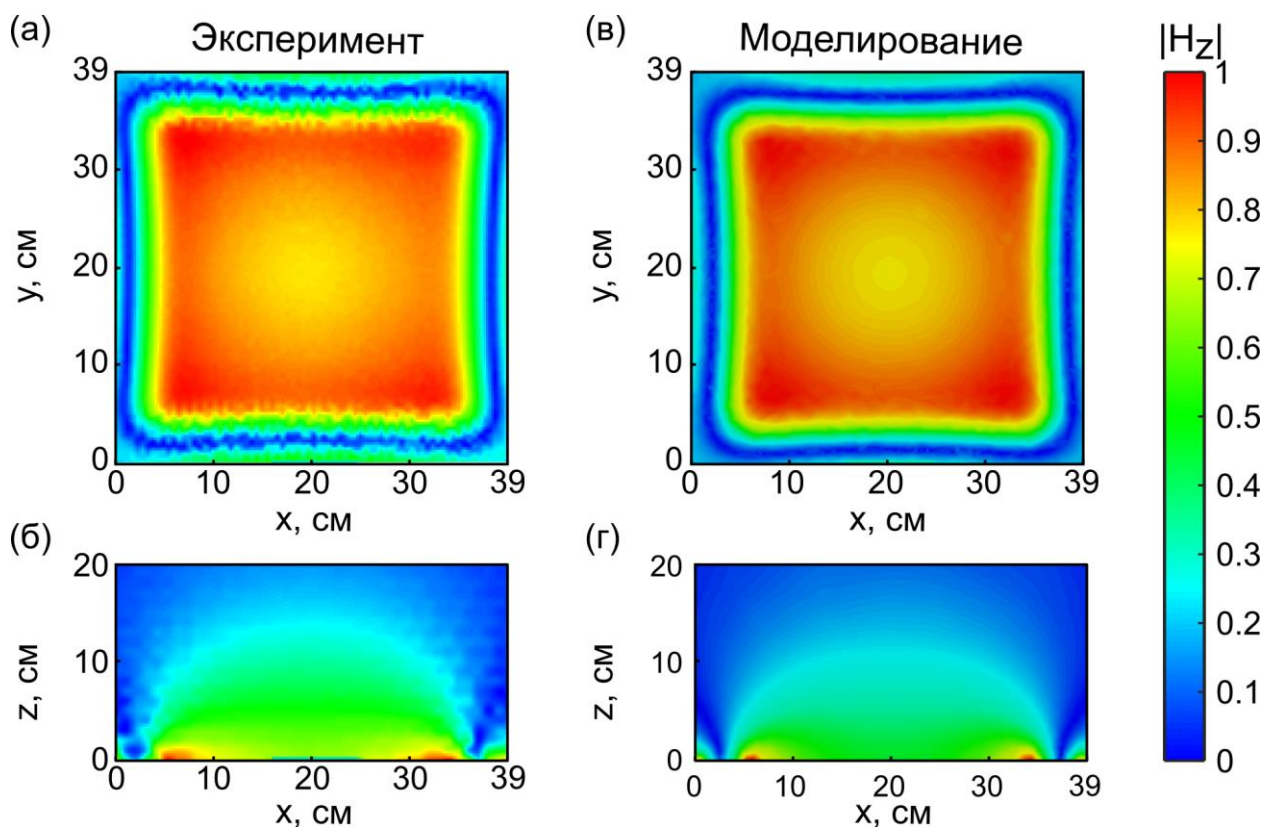


Рисунок 19 – Результат измерений магнитного поля: а) в плоскости параллельной резонатору на высоте 30 мм; б) в поперечной плоскости резонатора и сравнение с результатами расчетов (в, г)

Затем, для измерения эффективности БПЭ, магнитный зонд был заменен нерезонансной рамочной антенной размером 9×6 см, аналогичной той, которая использовалась для моделирования в главе 3.4. Затем было проведено сканирование с шагом 1 см в плоскости параллельной резонатору на высоте $h = 15$ мм с помощью 3D позиционера. В каждом положении приемника было проведено измерение S-параметров, из которых с помощью формулы (10) был проведен расчёт максимальной доступной эффективности БПЭ при выполнении условий, представленных формулами (11) и (12). Полученная карта эффективности для одного приемника показана на рисунке 20. Как можно видеть, максимальная эффективность БПЭ составляет 70 % почти над всей поверхностью резонатора и резко падает до 0 при приближении к его границам. Можно заметить, что экспериментально полученная максимальная эффективность отличается от рассчитанной в главе 3.4, что связано с высокими потерями в напечатанной на 3D принтере пластиковой прокладке между слоями

проводников, которые не были учтены в моделировании, а также с наблюдаемым сдвигом резонансной частоты из-за этих элементов. За счет увеличения резонансной частоты возросло влияние скин эффекта и диссипативных потерь энергии в металле. Тем не менее, как будет показано ниже, полученная эффективность равняется эффективности одного из предложенных ранее резонаторов, но при этом обеспечивается в разы лучшая однородность поля.

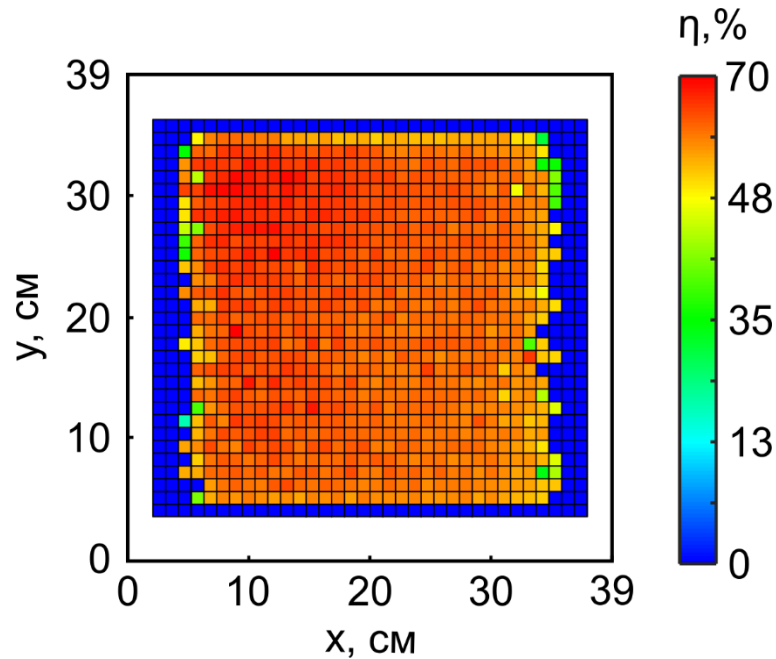


Рисунок 20 – Экспериментально измеренная эффективность БПЭ к нерезонансному приемнику размером 9×6 см на высоте 15 мм

4.3 Сравнительный анализ

Для того, чтобы лучше понять в чем заключаются преимущества и недостатки предложенного резонатора, а также показать их в сравнении с ранее предложенными резонаторами на основе метаповерхности и классическими спиральными катушками, использующимися в БПЭ, был проведен сравнительный анализ всех этих типов резонаторов, который представлен в таблице 2. Для расчёта большинства параметров было проведено численное моделирование этих структур в максимально схожих условиях: расчет коэффициента вариации проводился в пределах рабочей области каждой из них, при

этом она определялась как половина общей площади, добротность вычислялась по графику входного сопротивления по уровню -3 дБ для ненагруженного резонатора, значения эффективности были рассчитаны при одинаковой конфигурации приемников и их расстоянии до передатчика, расчет SAR производился по методике описанной в главе 3.5 и не был измерен экспериментально. Добротность катушки рассчитывалась через ее индуктивность, собственное сопротивление и согласующую емкость.

Таблица 2 – Сравнение основных характеристик передатчиков на основе метаповерхности для систем БПЭ и спиральной катушкой

Параметр	Тип резонатора				
	Гибридный	Гибридный (эксп.)	Катушка	[7]	[8]
SAR, мВт/кг	11	–	330	12	4,6
Добротность	200	217	120	114	270
Раб. область, см	28,2 × 28,2	28,2 × 28,2	28,2 × 28,2	21 × 31	35 × 35
Эффективность, %	89	70	77	80	70
CoV, %	6,6	4	25	23	37
Частота, МГц	27	36	27	17	19

Из полученной таблицы можно видеть, что предложенный в этой работе гибридный резонатор обладает самой высокой однородностью поля по сравнению с другими передатчиками. Рабочая область при этом даже больше, чем у резонатора из параллельных проводов, нагруженных на емкости. Как было показано в главе, посвященной исследованию электрического поля резонатора, для предложенной конструкции мы получаем выигрыш в SAR почти в 30 раз по сравнению со спиральной катушкой того же размера. Экспериментально измеренная эффективность равна измеренной эффективности резонатора из перекрещенных проводов, но при этом на 10 % меньше чем у резонатора [7] и почти на 20 % ниже чем в моделировании из-за неучтенных потерь в напечатанных на 3D принтере элементах и сдвига рабочей частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была предложена конструкция гибридного резонатора на основе метаповерхности и изучена возможность его применения в системах беспроводной передачи энергии в качестве передатчика. Было проведено численное исследование его характеристик, затем на основании численной модели был изготовлен прототип резонатора, с помощью которого экспериментально были подтверждены результаты моделирования.

Проведенный анализ собственных мод структуры показал, что в ней наблюдаются несколько собственных мод с уникальным распределением магнитного поля в каждой, при этом для задач беспроводной передачи энергии устойчивой к несоосному расположению приемника и передатчика, а также БПЭ «один-ко-многим», подходит самая низкочастотная мода, на которой наблюдается равномерное распределение магнитного поля.

В ходе параметрического анализа характеристик резонатора было продемонстрировано, что с помощью изменения его геометрии, а в особенности размеров диэлектрических вставок и их проницаемости возможно изменение рабочей частоты резонатора в широком диапазоне (от 100 МГц до 5 МГц), при фиксированных габаритах.

Была проведена оптимизация параметров диэлектрических вставок, а также распределения проводников в каждом из слоев структуры, в ходе которой было получено однородное распределение нормальной компоненты магнитного поля над поверхностью резонатора. Коэффициент вариации напряженности поля в рабочей области резонатора размером 28×28 см (половина его общей площади), на высоте 3 см составил 4 %, что было подтверждено экспериментально. При этом максимальная эффективность беспроводной передачи энергии к одному приемнику, полученная в ходе экспериментального исследования, достигает 70 % и не зависит от конкретного расположения приемника в пределах рабочей области.

Численная оценка радиочастотной безопасности показала, что предложенный резонатор обеспечивает в десятки раз меньший уровень $SAR = 11$ мВт/кг (при 1 Вт входной мощности) по сравнению с планарной спиральной катушкой того же размера. При этом его SAR того же порядка, что ранее известные в литературе конструкции резонаторов на основе метаповерхностей, с которыми был проведен сравнительный анализ.

Перечисленные выше параметры резонатора, а именно высокая однородность поля в большой рабочей области, возможность настройки на частоты международных стандартов БПЭ, высокая эффективность во всей рабочей области и низкий уровень SAR делают предложенную конструкцию перспективной для применения в системах БПЭ «один-ко-многим» в качестве передатчика.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Number of smartphone users worldwide from 2016 to 2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/> (дата обращения: 22.05.2021).
2. Tesla N. The Transmission of Electrical Energy Without Wires // *Electrical World and Engineer*. – 1904. – Т. 43. – С. 23760–23761.
3. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., и др. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances // *Science*. – 2007. – Т. 317, № 5834. – С. 83–86.
4. Wei X., Wang Z., Dai H. A critical review of wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances // *Energies*. – 2014. – Т. 7, № 7. – С. 4316–4341.
5. The Qi Wireless Power Transfer System Power Class 0 Specification. Part 4: Reference Designs. – 2017. № 1.2.3. 336 с.
6. Song M., Baryshnikova K., Markvart A., и др. Smart Table Based on a Metasurface for Wireless Power Transfer // *Physical Review Applied*. – 2019. – Т. 11, № 5. – С. 1.
7. Song M., Smirnov P., Puhtina E., и др. Multi-mode metamaterial-inspired resonator for near-field wireless power transfer // *Applied Physics Letters*. – 2020. – Т. 117, № 8. – С. 083501.
8. Markvart A., Song M., Glybovski S., и др. Metasurface for Near-Field Wireless Power Transfer with Reduced Electric Field Leakage // *IEEE Access*. – 2020. – Т. 8. – С. 40224–40231.
9. Shchelokova A. V., Slobozhanyuk A.P., Melchakova I. V., и др. Locally Enhanced Image Quality with Tunable Hybrid Metasurfaces // *Physical Review Applied*. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 014020.
10. Brui E.A., Shchelokova A. V., Sokolov A. V., и др. Magnetic Resonance Spectroscopy at 1.5 T with a Hybrid Metasurface // *JETP Letters*. – 2018. – Т. 108, № 6. – С. 423–427.
11. Slobozhanyuk A., Kivshar Y., Shchelokova A., и др. Tunable hybrid

metasurfaces for image quality enhancement // 2017 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2017. – С. 1497–1498.

12. Smirnov P., Song M., Kapitanova P. Numerical study of hybrid metasurface as WPT transmitter // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Т. 2300. – С. 020119.

13. Смирнов П., Сун М., Капитанова П., Глыбовский С. Устройство беспроводной передачи энергии // Патент РФ № 202324U1. – 2020. – С. 1–12.

14. Nguyen M.T., Nguyen C. V., Truong L.H., и др. Electromagnetic field based WPT technologies for UAVs: A comprehensive survey // Electronics (Switzerland). – 2020. – Т. 9, № 3. – С. 1–31.

15. Jawad A.M., Nordin R., Gharghan S.K., и др. Opportunities and challenges for near-field wireless power transfer: A review // Energies. – 2017. – Т. 10, № 7. – С. 1–30.

16. Lu F., Zhang H., Mi C. A review on the recent development of capacitive wireless power transfer technology // Energies. – 2017. – Т. 10, № 11. – С. 1752.

17. Guido K., Kiourti A. Wireless Wearables and Implants: A Dosimetry Review // Bioelectromagnetics. – 2020. – Т. 41, № 1. – С. 3–20.

18. Andreou A.G. Capacitive Inter-Chip Data and Power Transfer for 3-D VLSI // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2006. – Т. 53, № 12. – С. 1348–1352.

19. Sodagar A.M., Amiri P. Capacitive coupling for power and data telemetry to implantable biomedical microsystems // 2009 4th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering, NER '09. – 2009. – С. 411–414.

20. Fei L., Zhang H., Hofmann H., Mi C. A Double-Sided LCLC-Compensated Capacitive Power Transfer System for Electric Vehicle Charging // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – Т. 30, № 11. – С. 6011–6014.

21. Triviño-Cabrera A., González-González J.M., Aguado J.A. Fundamentals of Wireless Power Transfer // Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach, Power Systems. Springer Nature Switzerland, – 2020. – С. 1–18.

22. Zhou Y., Liu C., Huang Y. Wireless power transfer for implanted medical application: A review // *Energies*. – 2020. – Т. 13, № 11. – С. 2837.
23. Gladwin D., Mou X., Zhao R., Sun H. A Survey on Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer Technology for // *IET Power Electronics*. – 2019. – Т. 12, № 12. – С. 3005–3020.
24. Campi T., Cruciani S., Feliziani M., Maradei F. High efficiency and lightweight wireless charging system for drone batteries // *2017 AEIT International Annual Conference: Infrastructures for Energy and ICT: Opportunities for Fostering Innovation, AEIT 2017*. – 2017. – С. 1–6.
25. Sugino M., Kondo H., Takeda S. Linear motion type transfer robot using the wireless power transfer system // *ISAP 2016 - International Symposium on Antennas and Propagation*. – 2017. – С. 508–509.
26. Kim D., Hwang K., Park J., и др. High-Efficiency Wireless Power and Force Transfer for a Micro-Robot Using a Multiaxis AC/DC Magnetic Coil // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 22–25.
27. Yasar I., Shi L., Bai K.H., и др. Mobile phone mid-range wireless charger development via coupled magnetic resonance // *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2016*. – 2016. – С. 1–8.
28. Sandu C., Iordache M. Actual Study of Wireless Transmission of Electromagnetic Energy to a Mobile Phone // *The 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*. – 2015. – С. 73–78.
29. Shinohara N. *Wireless Power Transfer via Radiowaves*. Wiley-ISTE, – 2014. 256 с.
30. Jin K., Zhou W. Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2019. – Т. 34, № 4. – С. 3842–3859.
31. Ouyang J., Che Y., Xu J., Wu K. Throughput maximization for laser-powered UAV wireless communication systems // *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops*. – 2018. – С. 1–6.
32. Dunbar S., Wenzl F., Hack C., и др. *Wireless Far-Field Charging of a*

Micro-UAV // 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). – 2015. – C. 1–4.

33. Sood S., Kullanthasamy S., Shahidehpour M. Solar Power Transmission : From Space to Earth // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. – 2005. – C. 605–610.

34. Shi D., Zhang L., Ma H., и др. Research on Wireless Power Transmission System between Satellites // 2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). – 2016. – C. 1–4.

35. Clerckx B., Zhang R., Schober R., и др. Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2019. – Т. 37, № 1. – С. 4–33.

36. Gupta A., Goel V., Yadav V. Conversion of Sound to Electric Energy // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2014. – Т. 5, № 1. – С. 2146–2149.

37. Roes M.G.L., Duarte J.L., Hendrix M.A.M., Lomonova E.A. Acoustic energy transfer: A review // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Т. 60, № 1. – С. 242–248.

38. Lee W., Yoon Y.K. Wireless Power Transfer Systems Using Metamaterials: A Review // IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 147930–147947.

39. Hunton J.K. Analysis of Microwave Measurement Techniques by Means of Signal Flow Graphs // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1960. – Т. 8, № 2. – С. 206–212.

40. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection // Health Physics. – 1998. – Т. 74, № 4. – С. 494–522.

41. Robert F. C.J., Sylvar D.M., Ulcek J.L. Evaluating compliance with FCC guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields // FCC OET Bulletin 65. – 1997. – C. 1–79.

42. IEEE Std C95.1TM-2019 IEEE Standard for Safety Levels With Respect

to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. New York: IEEE, – 2019. 238 с.

43. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Москва: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, – 2003. 22 с.

44. Cannon B.L., Hoburg J.F., Stancil D.D., Goldstein S.C. Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Т. 24, № 7. – С. 1819–1825.

45. Song J., Liu M., Ma C. Analysis and design of a high-efficiency 6.78-MHz wireless power transfer system with scalable number of receivers // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2020. – Т. 67, № 10. – С. 8281–8291.

46. Liu F., Yang Y., Ding Z., и др. A Multifrequency Superposition Methodology to Achieve High Efficiency and Targeted Power Distribution for a Multiload MCRWPT System // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Т. 33, № 10. – С. 9005–9016.

47. Liu M., Chen M. Dual-band wireless power transfer with reactance steering network and reconfigurable receivers // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – Т. 35, № 1. – С. 496–507.

48. Zhao C., Costinett D. GaN-Based Dual-Mode Wireless Power Transfer Using Multifrequency Programmed Pulse Width Modulation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Т. 64, № 11. – С. 9165–9176.

49. Dai Z., Fang Z., Huang H., и др. Selective Omnidirectional Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer With Multiple-Receiver System // IEEE Access. – 2018. – Т. 6. – С. 19287–19294.

50. Kim Y.J., Ha D., Chappell W.J., Irazoqui P.P. Selective Wireless Power Transfer for Smart Power Distribution in a Miniature-Sized Multiple-Receiver System // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – Т. 63, № 3. – С. 1853–1862.

51. Pantic Z., Lee K., Lukic S.M. Receivers for multifrequency wireless power transfer: Design for minimum interference // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. – 2015. – Т. 3, № 1. – С. 234–241.

52. Zhong W., Hui S.Y.R. Auxiliary Circuits for Power Flow Control in Multifrequency Wireless Power Transfer Systems With Multiple Receivers // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2015. – Т. 30, № 10. – С. 5902–5910.

53. Belo D., Fernandes R., Collado A., и др. Boosting the Efficiency // *IEEE Microwave Magazine*. – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 87–96.

54. Furusato K., Imura T., Hori Y. Design of multi-frequency coil for capacitor-less wireless power transfer using high order self-resonance of open end coil // *2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference*. – 2016. – С. 1–4.

55. Jiang C., Chau K., Liu C., Han W. Time-division multiplexing wireless power transfer for separately excited DC motor drives // *2017 IEEE International Magnetism Conference, INTERMAG 2017*. – 2017. – С. 1–2.

56. Sun K., Fan R., Zhang X., и др. An overview of metamaterials and their achievements in wireless power transfer // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2018. – Т. 6, № 12. – С. 2925–2943.

57. Chen H.T., Taylor A.J., Yu N. A review of metasurfaces: Physics and applications // *Reports on Progress in Physics*. – 2016. – Т. 79, № 7. – С. 076401.

58. Wang B., Teo K.H., Nishino T., и др. Experiments on wireless power transfer with metamaterials // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Т. 98, № 25. – С. 1–4.

59. Bhattacharya A., Shaw T., Mitra D. Performance enhancement of wireless power transfer system by controlling transmission and reflection properties of metamaterials // *2018 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC)*. – 2018. – С. 4–7.

60. Zhu S., Zhao C., Huang Z., и др. Enhancement of wireless power transmission based on side-positioned metamaterials // *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. – 2018. – Т. 2018-Octob. – С. 241–245.

61. Casanova J.J., Ning Low Z., Lin J., Tseng R. Transmitting coil achieving

uniform magnetic field distribution for planar wireless power transfer system // 2009 IEEE Radio and Wireless Symposium. – 2009. – C. 530–533.

62. Liu X., Hui S.Y.R. Optimal design of a hybrid winding structure for planar contactless battery charging platform // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2008. – T. 23, № 1. – C. 455–463.