

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Институт Энергетический
Направление подготовки Электроэнергетика и электротехника
Кафедра Электропривода и электрооборудования

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование энергетических характеристик системы беспроводной зарядки электромобиля

УДК 629.113 : 621.355

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Крылов Виктор Николаевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор. каф. ЭПЭО	Завьялов В.М.	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель каф. МЕН	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. ЭПЭО	Дементьев Ю.Н.	к.т.н.		

Томск – 2017 г

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования, оборудования для научно-экспериментальных исследований.
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

¹ Указаны коды компетенций по ФГОС (направление 140400 – Электроэнергетика и электротехника), утвержденному Приказом Министерства образования и науки РФ 08.12.2009 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт Энергетический
 Направление подготовки Электроэнергетика и электротехника
 Кафедра Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой ЭПЭО
 _____ Ю.Н. Дементьев

**ЗАДАНИЕ
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5А	Крылов Виктор Николаевич

Тема работы:

Исследование энергетических характеристик системы беспроводной зарядки
 электромобиля

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Исследование беспроводной передачи энергии для зарядки электромобиля. Произведен обзор существующих методов беспроводной передачи энергии. Объектом исследования являются передающие катушки. В работе произведен расчет катушек, собрана экспериментальная установка, проведены опыты на установке и рассмотрены результаты исследования.</p>
--	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Титульный лист Запланированные результаты обучения по программе Задание Реферат Перечень сокращений в алфавитном порядке Введение Обзор литературы Объект и методы исследования. Описание различных видов беспроводной передачи энергии. Аналитика (аналитический обзор, теоретический анализ, проведение экспериментов) Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Социальная ответственность Заключение Список использованных источников Приложения</p>
<p>Перечень графического материала</p>	<p>Графический материал в приложениях отсутствует, так как все схемы приведены в магистерской диссертации</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Дашковский А.Г.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Н.Г.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение, обзор литературы, расчеты и аналитика, результаты проведенного исследования, финансовый менеджмент, социальная ответственность, заключение написаны на русском языке.

В приложении магистерской диссертации указано приложение на иностранном языке: Wireless power transmission by satellites to Earth, using high power lasers and a photovoltaic cavity converter and using electromagnetic resonance method.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. ЭПЭО	Завьялов В.М.	Д.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Крылов Виктор Николаевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа, состоящая из 118 страниц, 37 рисунков, 16 таблиц, 40 формул, 22 источников и одного приложения.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, резонанс, электромагнитное поле, катушка, электромобиль.

Цель работы – создание установки для изучения беспроводной зарядки электромобиля. Выявление проблем данного исследования и подсчет эффективности.

В процессе исследования проводился аналитический обзор литературных источников по тематике исследования. Найдены наиболее подходящие способы для изучения беспроводной передачи энергии в рамках лаборатории. Определены параметры и форма катушек наиболее подходящие для исследования. Проведены опыты по исследованию факторов влияющих на работу системы и сняты показатели эффективности.

Степень внедрения. Проведение практических исследований по беспроводной передаче энергии дадут положительные результаты и возможность увеличивать эффективность передачи энергии и увеличение расстояния передачи.

Область применения. Энергетика. Медицина. Электроника. Бытовая техника.

Значимость работы. Система беспроводной зарядки электромобиля может применяться не только для заряда автомобилей, но и в других сферах. Данная система позволит уйти от привычных для людей большого количества проводов и облегчит жизнь человека. С экономической точки зрения, система, при совершенствовании беспроводной передачи в будущем, позволит сократить затраты на токопроводящих жилах.

Оглавление

Введение.....	11
1. Беспроводная передача солнечной энергии спутником на Землю, за счет СВЧ излучения	14
1.1. Влияние атмосферы или окно прозрачности ионосферы.....	15
1.2. Генерирование излучения высокой мощности.....	15
1.3. Передающие и приемные антенны	16
1.4. Электромагнитные помехи относительно существующих беспроводных систем	17
1.5. Биологическое воздействие на ткани человека и животных	17
2. Беспроводная передача энергии, при помощи лазера и фотоэлектрического преобразователя.....	19
2.1. Эксперимент по передаче энергии при помощи Nd:YAG лазера и PowerSphere	20
2.2. Результаты эксперимента по передаче энергии при помощи Nd:YAG лазера и PowerSphere	22
3. Беспроводная передача энергии, при помощи LC компенсации.....	24
3.1. Недостатки передачи без резонанса	24
3.2. Принципы LC компенсации	25
3.3. Резонансная эффективность и общая эффективность	26
4. Выводы обзора литературы	27
5. Определение параметров связанных контуров.....	29
5.1. Определение собственной индуктивности квадратной катушки	29
5.2. Определение взаимной индуктивности двух катушек	32
5.3. Собственная емкость и активное сопротивление квадратного контура.....	34
5.4. Коэффициент связи и добротность катушек.....	35

5.5. Схема замещения двух связанных контуров	36
6. Экспериментальное исследование системы беспроводной зарядки аккумулятора электромобиля	42
6.1. Описание экспериментальной установки	42
6.2. Определение резонансной частоты первичного контура	45
6.3. Определение резонансной частоты вторичного контура	48
6.4. Резонансные кривые двух связанных катушек.....	52
6.5. Эффективность системы при смещении катушек	55
6.6. Эффективность системы при расположении преграды между катушками.....	57
6.7. Вариации нагрузок в системе беспроводной зарядки электромобиля	61
6.8. Общая эффективность системы беспроводной зарядки электромобиля.....	65
7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .	67
7.1. Планирование проектных работ.....	68
7.2. Определение работ и этапов выполнения проекта.....	68
7.3. Разработка графика проведения научного исследования.....	70
7.4. Смета затрат на исследование	71
7.4.1. Затраты на заработную плату	71
7.4.2. Отчисления на социальные нужды	72
7.4.3. Амортизация компьютерной техники	73
7.4.4. Прочие затраты исследования.....	73
7.4.5. Накладные расходы	74
7.4.6. Итоговые затраты на проектирование	75
7.5. Смета затрат на оборудование и монтажные работы	75
7.6. Сравнительные показатели эффективности проекта	76
8. Социальная ответственность	80
8.1. Рабочее место	80

8.2. Вредные производственные факторы.....	80
8.3. Экологическая безопасность	81
8.4. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов.....	82
8.5. Анализ выявленных вредных факторов	83
8.6. Электромагнитное излучение.....	84
8.7. Освещенность.....	86
8.8. Микроклимат производственных помещений.....	87
8.9. Техника безопасности	89
8.10. Анализ выявленных опасных факторов	90
8.11. Пожарная безопасность.....	92
8.12. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	95
Заключение	97
Список использованных источников	99
Приложение А	

Введение

Беспроводная передача энергии — передача энергии без использования токопроводящих жил в электрической цепи. К 2017 году существуют успешные опыты многих ученых мира. Один из успешных опытов по передачи энергии мощностью более десятков киловатт в микроволновом диапазоне с КПД около 40 % — в 1975 году в Goldstone, Калифорния и в 1997 в Grand Bassin на острове Реюньон (на расстояние более километра, исследования в области энергоснабжения удаленного населенного пункта без прокладки кабельной электросети).

Беспроводная передача энергии может осуществляться различными способами:

- индукционный (небольшие расстояния и относительно малые мощности);
- резонансный (бесконтактные смарт-карты и чипы);
- направленный электромагнитный (УФ излучение до СВЧ).

Беспроводная передача энергии являлась предметом длительных обсуждений последние несколько десятилетий. Особое внимание первоначально уделяли передаче сверхмощной энергии на большие расстояния при помощи СВЧ излучения (в первую очередь для передачи космической солнечной энергии и для электропитания труднодоступных или заброшенных районов), а также уделяли внимание передаче маломощной энергии на малые расстояния (для беспроводной системы потребления электроэнергии и для использования в медицине).

Исследования и разработки связанные с беспроводной передачей энергии представлены ниже в виде списка, по которому видно, что исследования и

разработки в данной области начались очень давно. Первые эксперименты по передаче энергии были проведены Николой Тесло в 1899.

1864 – Джеймс Максвелл спрогнозировал существование радиоволн;

1884 – Джон Пойтинг придумал вектор Пойтинга (вектор потока энергии) для того, чтобы определять количество электромагнитной энергии.

1888 – Генрих Герц экспериментальным путем доказал существование радиоволн;

1899 – Марчис Маркони и Регинальд Фесэдн изобрели беспроводную систему связи посредством радиоволн;

1856-1943 – Никола Тесла провел первые эксперименты по беспроводной передаче энергии;

1889 – первая беспроводная телекоммуникационная башня Ворденклиф была представлена Николой Тесла.

Вторая мировая война – изобретен преобразователь микроволновой энергии;

1964 – Вильям Брайн начал первые научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы над передачей энергии на СВЧ;

1940-50е – был построен фотоэлектрический преобразователь;

1958 – был предложен американский спутник солнечной энергии;

1968 – Питер Глейзер предложил систему солнечных спутников;

1978- 1981 – была подтверждена программа министерства энергетики США;

1980е – была запущена система японских спутников;

1987 – начался канадский проект;

1995 – НАСА подтвердили новый подход к солнечной энергии;

1999 – подтвердился тестовый запуск космического электрического двигателя;

2012 – запущен китайский проект (было проведено 2 крупных государственных собрания и по их результатам подписаны правительственные документы);

2025 – ожидается демонстрация низкобюджетного варианта.

Беспроводную передачу энергии можно осуществлять различными способами, которые рассмотрены в обзоре литературы в данной диссертации. Более детальное рассмотрение и расчеты представлены для беспроводной передачи энергии электромагнитным способом для зарядки электромобиля. Данный метод более экономичен и относительно легко осуществим, в сравнении с другими методами. Резонансный метод по исследованию беспроводной зарядки электромобиля может широко использоваться в различных сферах промышленности, медицине и т.п.

1. Беспроводная передача солнечной энергии спутником на Землю, за счет СВЧ излучения

Ранние исследования и разработки системы беспроводной передачи сверхмощной энергии на большие расстояния были предложены для системы мощных солнечных спутников и их использования для беспроводной передачи высокоомощной энергии на землю, как показано на рисунке 1. Было предложено 2 вида передачи:

- Передача за счет распространение сверхвысокочастотных волн;
- Передача за счет распространение оптического или лазерного излучения.

Из-за больших потерь при передаче лазером во время туманов или дождей, от механизма распространения лазерного излучения отказались, и рассматривался способ беспроводной передачи энергии на Землю за счет СВЧ излучения.

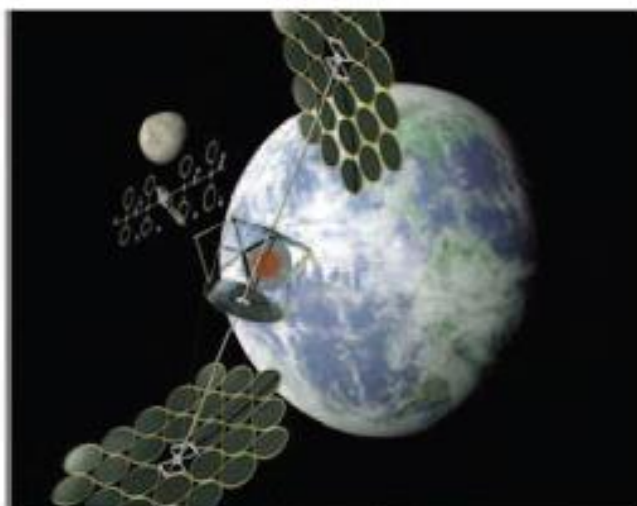


Рисунок 1 – Иллюстрация космического спутника электростанции солнечной энергии

Для существования данной идеи передачи солнечной энергии спутниками, необходимо, чтобы система обладала следующими характеристиками:

- низкое расположение спутников;
- работа при любых погодных условиях;
- складная антенна на спутнике;
- производство высокой мощности;
- система пульсовой волны, для использования в военных целях и система постоянных пульсовых волн для выработки природосберегающей, возобновляемой энергии.

1.1. Влияние атмосферы или окно прозрачности ионосферы

Для того чтобы построить такую систему, необходимо определить рабочую частоту микроволн, которые проходят через атмосферу. В экспериментах использовали две частоты – 2.45 ГГц и 5.8 ГГц . Однако, более детальное исследование необходимо для того, чтобы определить спектр частот или окно прозрачности ионосферы, за счет которых микроволны могут проходить через атмосферу, и при этом ионосфера не будет ионизироваться и формировать загряздающий слой. Эффекты, из-за слоя осадков и тропосферы, также важны и должны быть взяты во внимание при рассмотрении системы. В 1978 году модель электрического нагрева Перкинса и Роубела вызвала беспокойства относительно воздействия на ионосферу. Хотя исследование было проведено и получено немало полезных результатов, все же требуется больше исследований на эту тему, в виду постоянного изменения атмосферы.

1.2. Генерирование излучения высокой мощности

Выработка энергии высокой мощности является одной из главных отправных точек для исследования и разработки, которые должны быть проведены. Обычно используются два вида излучателя высокой мощности,

первый – электронный СВЧ-прибор, второй – полупроводниковый усилитель. Микроволновый генератор/усилитель имеет различные электрические заряды. Электронный СВЧ-прибор может производить и усиливать микроволны высокой мощности (сверх kW), при заданном высоком напряжении (сверх kV). Полупроводниковый усилитель может обеспечивать микроволны малой мощности (меньше $100 W$) при заданном низком напряжении (ниже $15 V$), но это дорого. Хотя идет немало обсуждений касательно эффективности генератора/усилителя, в общем электронный СВЧ-прибор имеет большую эффективность (выше 70%), а полупроводниковый усилитель имеет меньшую эффективность (менее 50%).

1.3. Передающие и приемные антенны

Передающая антенна и антенная решетка, требуемые для передачи энергии высокой мощности на большие расстояния, должны быть с большим усилением, и весьма низкими боковыми и задними лепестками диаграммы направленности. Также, желательно, чтоб на лепестках антенны были сканирующие регистры. Несколько разных антенн могут быть установлены для системы беспроводной передачи энергии, например, антенна типа «волновой канал», рупорная антенна, параболическая зеркальная антенна, микро-полосковая антенна, фазированная антенная решетка или несколько других видов антенн. Для того, чтобы лепестки были узкими, а сама антенна была с высоким усилением для системы беспроводной передачи энергии, обычно выбирают большую параболическую антенну или большой ряд щелевых антенн. Для того чтобы антенные решетки были легкими, складными и равноугольными, хорошо подходят микро-полосковые антенны, хотя усиление не высокое.

Приемная антенна-выпрямитель относится к антеннам с выпрямляющимися частями для получения и исправления микроволн в

передающей части всей системы беспроводной передачи энергии. Поэтому, антенна-выпрямитель или антенна со встроенными выпрямителями, является важной частью системы, и действие антенн-выпрямителей значительно влияет на КПД преобразования инвертора и на общий КПД системы беспроводной передачи. Предпочтительна нелинейная приемная антенная решетка и ее форма должна быть оптимальной для достижения наилучшего приема микроволновой энергии.

1.4. Электромагнитные помехи относительно существующих беспроводных систем

Ссылаясь на литературу, существующие системы беспроводной передачи энергии на большие расстояния работают на двух сверхвысоких частотах, около $2,45 \text{ ГГц}$ или $5,82 \text{ ГГц}$. Эти две рабочие частоты уже были выделены в регламенте радиосвязи в Международном союзе радиосвязи для многих служб. В то же время, они также назначаются для медицинского и промышленного применения, например, частота $2,45 \text{ ГГц}$ используется для локальных сетей и микроволновок, а $5,8 \text{ ГГц}$ часто используется в различных областях, таких как радиолокационная служба и краткосрочные специально выделенные линии связи. По этой причине, эффект электромагнитной совместимости и помех на этих двух частотах стали актуальной темой для обсуждения, и требуется больше исследований для того, чтобы получить физическое понимание проблем электромагнитной сочетаемости и электромагнитных помех и минимизировать эти помехи.

1.5. Биологическое воздействие на ткани человека и животных

Общий публичный интерес к передаче микроволн высокой мощности из космоса на Землю обусловлен опасностью, которую они представляют для тканей

человека и животных. С 1950 года, множество документов были опубликованы по теме биологического воздействия микроволн на биосферу. Научные исследования направлены на два аспекта, первый – нагрев человеческого тела, подвергнутого воздействию СВЧ-излучения, второй – биологическое воздействие на разрушение ДНК. Относительный предел облучения, зафиксированный в стандартах Института инженеров электротехники и электроники при частоте $2,45 \text{ ГГц}$ или $5,82 \text{ ГГц}$, составляет $81,6 \text{ Вт/м}^2$ и 100 Вт/м^2 в среднем за 6 минут, и $16,3$ или $38,7 \text{ Вт/м}^2$ в среднем за 30 минут. Этот уровень намного ниже, если сравнивать со средним уровнем солнечной радиации в 1000 Вт/м^2 . По подсчетам и заключениям можно сделать вывод, что микроволновое облучение человеческого тела и животных схож по своему влиянию на лунный свет. Немало заявлений по поводу малоактивных нетепловых воздействий они кажутся низкотемпературными и безопасными в сравнении с полученными и смоделированными результатами. Так же существует мнение, что долгосрочное воздействие волн низкой активности может быть небезопасным и может вызвать онкозаболевания. Однако, из-за большого количества неясностей, исследования такого рода все еще продолжаются и нуждаются в комплексном анализе и экспериментах по биологическим воздействиям.

Проводились экспериментальные тесты, в которых изучали воздействие микроволновой радиации на птиц для того, чтобы проверить так называемый «эффект сгоревшей птицы» на частоте $2,45 \text{ ГГц}$. В исследованиях зафиксировано слабое тепловое воздействие, и сделан вывод, что тепловое воздействие должно избегаться. Крупные птицы обычно испытывают больше теплового стресса, чем птицы поменьше. Общим выводом о биологическом воздействии является то, что микроволновое излучение обычно безвредно, за исключением случаев сильного излучения, намного превышающего существующие предел облучения.

2. Беспроводная передача энергии, при помощи лазера и фотоэлектрического преобразователя

PowerSphere (PS) – это высокоэффективная фотоэлектрическая преобразовательная камера (PVCC), находящаяся на стадии разработки, предназначенная для беспроводной передачи энергии или лазерного излучателя мощности (Laser Power Beaming). Целевой диапазон мощности составляет от 1 кВт до 100 кВт. В качестве приемника используется модифицированный солнечный PVCC, оснащенный передовыми кремниевыми клетками.

PowerSphere является разновидностью фотоэлектрической преобразовательной камеры для солнечных систем, которая была разработана в рамках нескольких DOE/NREL субконтрактов и грантов Калифорнийской энергетической комиссией. Соответствующие исследования показали, что система из четырех различных клеточных материалов, с совпадающими запрещенными зонами и сопряженных фильтров, можно добиться эффективности преобразования ~ 50% @500xAM1.5.

Исследования прогнозируют, что сфера, настроенная на одну частоту Nd:YAG лазера и оснащенная точно настроенными (точность ширины запрещенной зоны) III-V фотоэлементами, будет достигать КПД 60 - 65% при уровне потока света внутри полости 50 Вт/см².

PowerSphere оснащена кремниевыми клетками SunPower (концентраторы HEDA312), которые имеют повышенную квантовую эффективность в ближнем ИК-диапазоне. Клетки кремния занимают 24% площади полости стены сферы. Остальная часть покрывается материалом Spectralon, который имеет самый высокий коэффициент диффузного отражения, и золотым покрытием.

Проект в целом ориентирован на расходимость близкую к дифракционной *Nd:YAG* лазеров, работающих на $1,064$ мкм. *PowerSphere* легкая, компактная, мобильная и надежная. Таким образом, она обеспечивает высокие удельную мощность (>1500 Вт/кг) и удельный объем (Вт/м³) в космосе и в атмосфере. Эти передовые особенности *PS* и *Nd:YAG* систем, основаны на последних достижениях включая: а) точность "запрещенной зоны" в ближнем инфракрасном диапазоне; б) постоянный прогресс в повышении качества пучка и выходной мощности *Nd:YAG* лазеров.

Nd:YAG лазеры, в сочетании с адаптивной оптикой и точно настроенной *PS*, обеспечат возможность применения в различных сферах. Наземные применения включают дистанционное питание роботизированным устройствам для эксплуатации в опасных условиях, например, поле боя, огонь, хранения радиоактивных материалов и т.д. Для использования в космосе *NASA* и *NGST* изучают дистанционное питание автомобиля *Mars Rover*. Применение в пределах атмосферы Земли, включает в себя обеспечение питания на большой высоте дирижаблей и непрерывного полета беспилотных летательных аппаратов.

2.1. Эксперимент по передаче энергии при помощи *Nd:YAG* лазера и *PowerSphere*

Как показано на рисунке 2, луч мощностью 200 Вт *Nd:YAG* лазера направлен на входное отверстие светоотражающего параболического концентратора, без каких-либо дополнительных оптических компонентов для того, чтобы контролировать форму луча. Параболический концентратор вносит свет во внутреннюю часть сферы через маленькое отверстие ($D=1,48$ см) в стенке сферы. Диаметр луча на расстоянии 3 м от лазера составляет примерно 2.5 см. На рисунке 3 показано пятно лазерного луча на мишени из молибдена, сделанные цифровой ИК-камера.

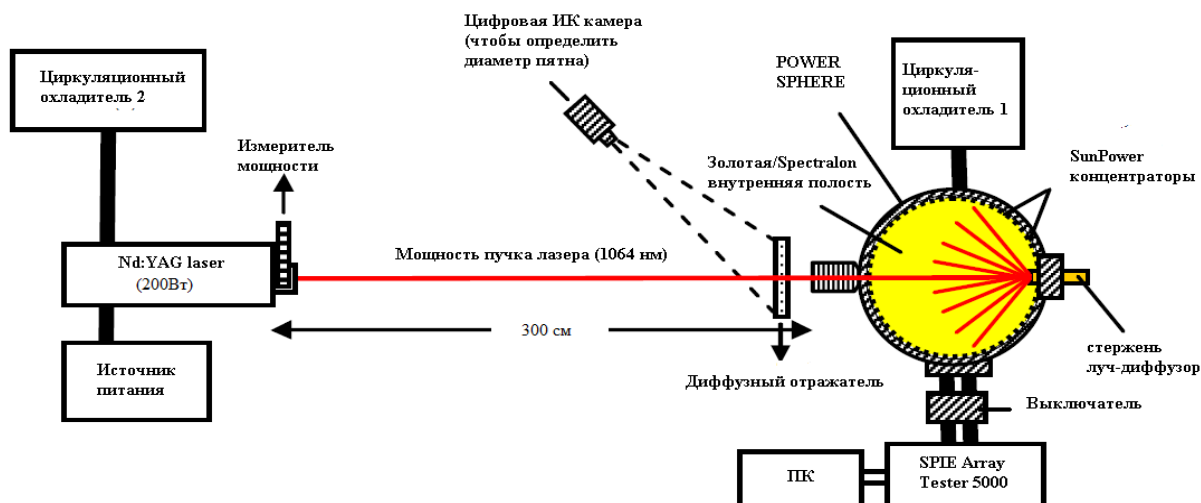


Рисунок 2 – Схема испытательной установки *Laser Power Beaming*

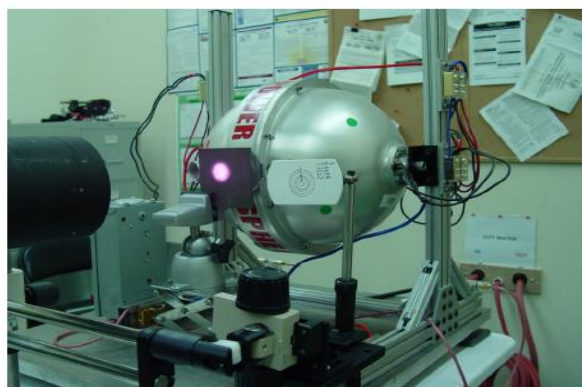


Рисунок 3 – Пятно лазерного луча на молибденовой мишени

При таком диаметре, большая часть луча входит в полость сферы без отражений и падает на стержень луча-диффузора. Отраженный свет освещает полость *PowerSphere* равномерно, о чем свидетельствует плоская вершина тока на рисунке 4.

Используемый в эксперименте *Nd:YAG* лазер работает в непрерывном режиме с простым резонатором. Генератор приобретен у *Lee Laser* в Орландо, Флорида, а остальная часть лазера собрана на месте. Максимальная выходная мощность получаемая таким лазером *200 Wm*.

Внутренняя стенка полости покрыта 22 мини модулями, каждый из которых состоит из 12 *HEDA312* клеток производства *SunPower*. Эти клетки с большой концентрацией кремния приспособлены для спектра солнечных излучений $500 \times AM1.5$. Из-за очень низкой плотности потока внутри полости сферы ($0,075 \text{ Вт/см}^2$ при 160 Вт .), охладитель 1, показанный на рисунке 2, не используется.

Эксперимент проводился с *SPI-ARRAY TESTER 5000*. Это устройство представляет собой портативную систему, способную измерять и сохранять показатели тока и напряжения более крупной фотоэлектрической системы. Измеритель параметров исследует модули или элементы при выходной мощности от 10 Вт до 50 кВт . На рисунке 2 показано как подключен измеритель с сопроводительным компьютером.

Эксперимент был проведен с двумя полусферами (в каждой по 11 мини-модулей), которые подсоединены либо параллельно, либо последовательно. Обе полусферы дали похожие результаты. Температура работы клеток, мощность луча и интенсивность света внутри сферы были вычислены отдельно независимо от измерителя.

2.2. Результаты эксперимента по передаче энергии при помощи *Nd:YAG* лазера и *PowerSphere*

С точки зрения фотоэлектрической энергетической установки, *PowerSphere* представляет собой «антенну», состоящую из большого количества мини-модулей. Поэтому эффективность, которую измеряли, должна рассматриваться как эффективность «антенны», а не эффективность «модулей». На рисунке 4 представлены параметры испытаний *PowerSphere*, полученные в последовательной конфигурации. В таблице 1 приведены все ключевые

измерения, полученные в ходе теста для *PowerSphere*, находящиеся под воздействием луча *Nd:YAG* лазера.

Таблица 1 – Система ключевых параметров и эффективность системы

Параметр	Значение
Мощность луча	160 Вт
Диаметр луча	2,5 см
Температура клетки	410 °С
Оптические потери	10 %
V_{oc}	15,8 В
I_{sc}	1,5 А
P_{max}	18,96 Вт
Измеренная эффективность	11,9 %
Эффект. с поправкой на Оптические потери и температуру 250°С	14,2 %

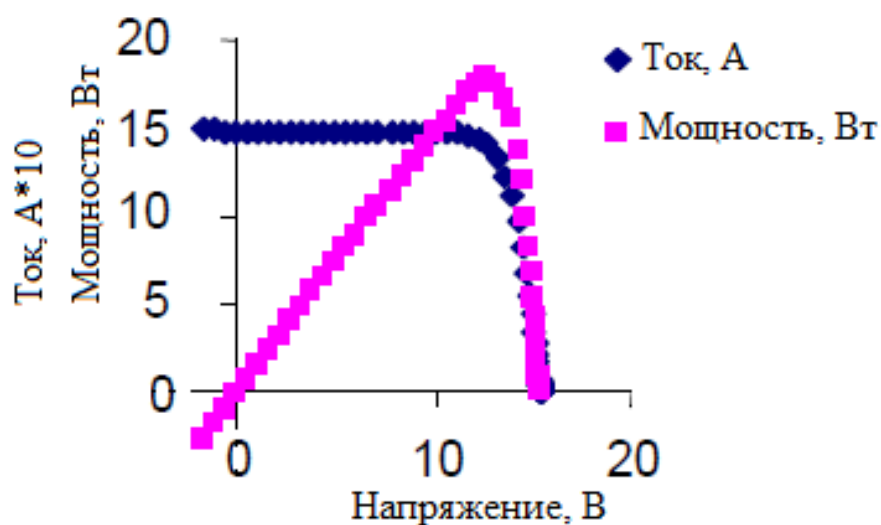


Рисунок 4 – Показания *PowerSphere* при последовательной конфигурации, полученные с мощностью луча 160 Вт *Nd:YAG* лазера

3. Беспроводная передача энергии, при помощи LC компенсации

Интерес к исследованию технологий беспроводной передачи энергии без использования провода для зарядки увеличился после того, как Массачусетский технологически институт представил магнитно-резонансную технологию в 2007. Обычно электромагнитные индукционные системы требуют высокий коэффициент связи, что препятствует передаче электроэнергии на дальние расстояния. Но этот метод может быть очень эффективным для передачи электроэнергии на расстояние 1-2 метра. Коэффициент связи катушки уменьшается с увеличением расстояния передачи. Тем не менее, при использовании подходящего конденсатора, можно сформировать явление резонанса. Способность передачи мощности была увеличена с использованием явления резонанса, даже если коэффициент связи очень мал.

3.1. Недостатки передачи без резонанса

Рисунок 5 показывает изменение выходной мощности, из-за изменения коэффициента сцепления и силы сопротивления. Система передачи за счет электромагнитной индукции использует электродвижущую силу, выработанную за счет изменения потока магнитной индукции, который проходит через другую катушку. Так как потокосцепление волн усиливается при условии, что катушки находятся очень близко, коэффициент связи тоже увеличивается. Однако если потокосцепление уменьшается при условии, что расстояние между катушкой увеличивается, то индукция рассеяния увеличивается и коэффициент связи уменьшается. Как показано на рисунке 5, полученная энергия значительно сокращается, если коэффициент связи мал. Метод электромагнитной индукции может передавать достаточно энергии только на малом расстоянии. Как показано на графике коэффициента связи на рисунке 5, максимум генерируемой мощности

сократится, если коэффициент связи мал. Если необходимо передать достаточно энергии даже при условии маленького коэффициента связи, то необходимо применить технологию, чтобы компенсировать недостаток индукции.

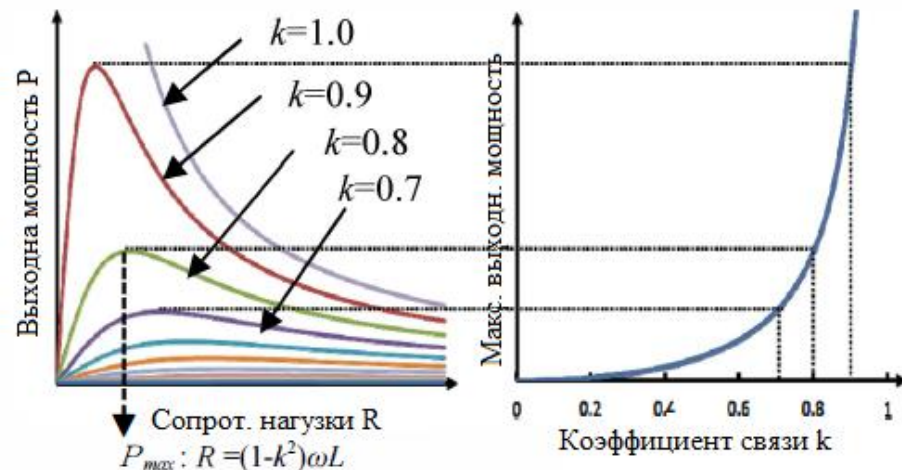


Рисунок 5 – Зависимость выходной мощности от коэффициента связи

3.2. Принципы LC компенсации

Когда индуктивность и емкость соединены последовательно, как показано на рисунке 6 (а), происходит последовательный резонанс, разница напряжений по схеме LC считается равной нулю, как показано на рисунке 6 (б). Тем не менее, внутреннее сопротивление существует в каждом элементе схемы, что приводит к потере мощности. Сформированные напряжения в L и C элементах не должны превышать их допустимое напряжение.

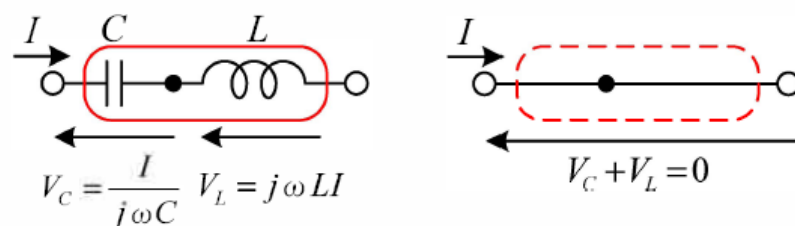


Рисунок 6 – Принципы LC компенсации

3.3. Резонансная эффективность и общая эффективность

На рисунке 7 показана система беспроводной передачи энергии. Для того чтобы говорить об эффективности, следует различать общую эффективность, относящуюся ко всей системе, и резонансную эффективность, между резонаторами. В методе электромагнитного резонанса, многие технологии направлены на резонансную эффективность между резонаторами. Однако, из-за внутреннего сопротивления источника энергии, схемы выпрямителя и инвертора, появляются дополнительные потери энергии. Общая эффективность становится ниже, чем резонансная эффективность. Более того, так же необходимо понимать, что выходная мощность на нагрузке, это и есть общая эффективность. Для того чтобы увеличить общую эффективность всей системы, необходимо обеспечить высокую резонансную эффективность между резонаторами. Однако, если выходная энергия и общая эффективность низки, то эта схема не подходит для практического использования.

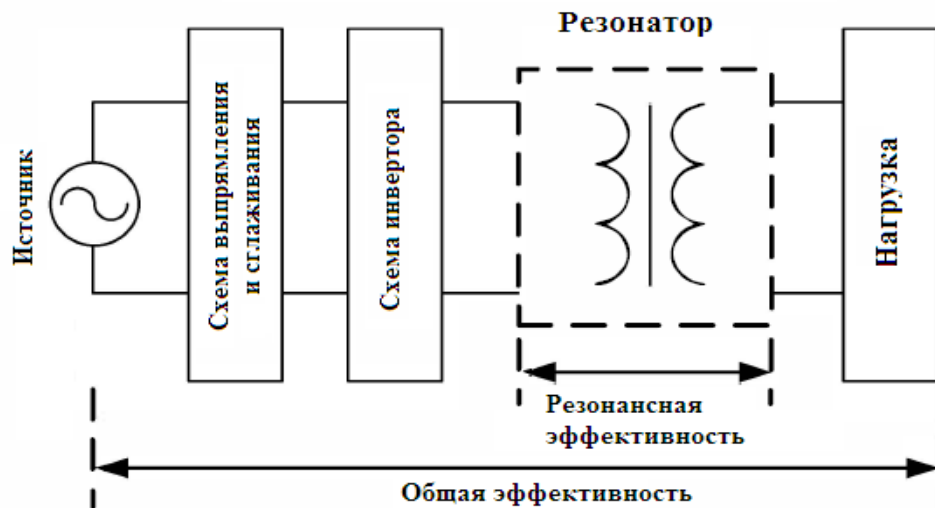


Рисунок 7 – Схема беспроводной передачи энергии

4. Выводы обзора литературы

Рассмотрены способы передачи энергии различными способами и существующие установки. Кратко рассмотрены ключевые вопросы относительно передачи энергии высокой мощности на большие расстояния и краткосрочной передачи энергии малой мощности и их применение.

Применение систем беспроводной передачи энергии высокой мощности на большие расстояния главным образом подходит для солнечных спутников и удаленных источников питания. Система краткосрочной беспроводной передачи энергии малой мощности применяется в электроэнергетических системах для формирования беспроводных источников питания, в беспроводных системах зарядки и также в медицинских физиологических датчиках и диагностических системах. Проблема заключается в применении и ожидается, что она возрастет в ближайшее время.

Эксперимент *PS* и *Nd:YAG* удачно демонстрирует передачу энергии в свободном пространстве (беспроводная и безволоконная). Для демонстрации используется *200 Wm* лазер непрерывного излучения, в качестве источника луча, и *PowerSphere*, в качестве приемника. На расстоянии 3 метра от лазера до ресивера и при мощности луча в *160 Wm PowerSPHERE* генерирует около *19 Wm*. Модель *PowerSphere*, использованная для такого эксперимента, оборудована новейшими, усовершенствованными клетками с большой концентрацией кремния.

Заявленная эффективность лазерной установки равная *14,2%* должна рассматриваться в условиях:

- а) кремниевые клетки не слишком подходят на волны длиной *1064 нм*;
- б) плотность потока внутри сферы на *30%* меньше, чем плотность солнечного потока, хотя клетки подходят для восприятия света *500* солнц;

в) Стандартное противоотражательное покрытие для тестовых клеток внутри *PowerSphere* имеет отражательную способность примерно 15% для 1064нм;

г) клеточная популяция внутри сферы составляет лишь 24%, сильно сокращая эффективность использования фотонов.

Учитывая эти факты, результаты эксперимента можно считать благоприятными. Если, с поправкой на эти ограниченные факторы, *PowerSphere*, оборудованная усовершенствованными клетками, будет преобразовывать излучение *Nd:YAG* лазера в электричество, с эффективностью 40%.

Программа по оптимизации систем *PowerSphere* включает в себя разработку и развитие новых энергетических щелей, создающих тип клеток, которые оптимально соответствуют частоте работы *Nd:YAG* лазера. Для последующих разработок *PowerSphere*, оснащенных настроенными по частоте клетками, аналитическая модель подразумевает КПД преобразования на уровне 60%-65%. Настоящий лазер имеет низкую эффективность, равную всего нескольким процентам. Для увеличения общей эффективности также важно улучшить эффективность лазера самого по себе. Наблюдается хороший прогресс в добавлении твердотельного диода в *Nd:YAG* лазер.

Самый подходящий и менее затратный способ по беспроводной передаче энергии для исследования беспроводной зарядки электромобиля, это способ, основанный на принципе электромагнитной индукции. Имеющиеся приборы на кафедре, позволяют собрать экспериментальную установку, по схеме представленной на рисунке 7, и провести опыты рассматриваемой системы зарядки. В диссертационной работе будут рассмотрены проблемы и преимущества данного метода беспроводной передачи энергии.

5. Определение параметров связанных контуров

Два контура называются связанными, если энергия из одного контура переходит в другой. Контур, питающийся непосредственно от генератора, называют первичным или передающим, а контур, в котором колебания возникают под действием первичного контура, - вторичным или принимающим. Связь в нашем случае, осуществляется через общий магнитный поток, т.е. за счет взаимной индуктивности. Степень взаимного воздействия контуров зависит от расстояния между катушками и их взаимного расположения.

В исследовании рассмотрена система индуктивно связанных контуров, состоящая из прямоугольных катушек круглого сечения.

5.1. Определение собственной индуктивности квадратной катушки

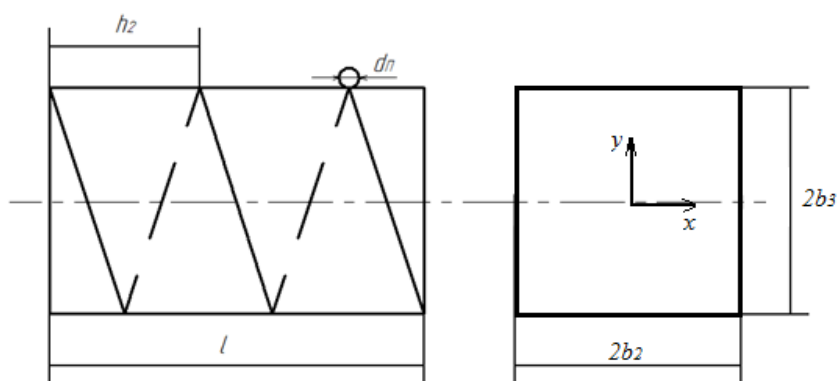


Рисунок 8 – Геометрическая модель однослойной прямоугольной катушки

На рисунке 8 изображена геометрическая модель прямоугольной катушки, где h_2 – шаг намотки, $d_{\text{л}}$ – диаметр провода, $2b_2 \times 2b_3$ – стороны каркаса длиной l , ω – число витков катушки.

Собственную индуктивность катушки можно найти различными способами, рассмотрим некоторые из них.

1) Индуктивность катушки может быть найдена по формуле

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{\omega} \sum_{m=1}^{\omega} \sum_{p=\pm 1} \left(\int_{x_1=0}^{b_2+d_{II}/2} \int_{x_2=-b_2}^{b_2} \frac{p \cdot dx_1 \cdot dx_2}{\sqrt{(x_1-x_2)^2 + (b_3 - pb_3 + d_{II}/2)^2 + h_2^2(m-k)^2}} + \right. \\ \left. + \int_{y_1=0}^{b_3+d_{II}/2} \int_{y_2=-b_2}^{b_2} \frac{p \cdot dy_1 \cdot dy_2}{\sqrt{(y_1-y_2)^2 + (b_2 - pb_2 + d_{II}/2)^2 + h_2^2(m-k)^2}} \right) \quad (1)$$

Расчет индуктивности по этой формуле сводится к нахождению отношений b_3/b_2 , h_2/b_2 , l/b_2 , d_{II}/b_2 и определении $L \cdot h_2^2 / (b_2 l^2)$ по таблице [1, с. 45].

2) Так же индуктивность может быть найдена по следующей формуле

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \omega^2 c \cdot \Phi \quad (2)$$

где, μ_0 – магнитная постоянная;

c – сторона катушки, м.

Величина Φ , входящая в формулу, находится по таблице в зависимости от отношения $\gamma = c/l$. [2, с. 353].

3) Индуктивность так же можно определить приближенной формулой

$$L \approx 8 \cdot 10^{-7} N^2 c \left(\ln \left(\frac{1.4142 \cdot cN}{(N+1)l} \right) + 0.37942 + \frac{0.3333(N+1)l}{cN} \right) \quad (3)$$

где, N – число витков катушки;

c – сторона катушки, м;

l – длина катушки, м.

Катушки, используемые в опытах, представляют собой несколько обмоточных проводов ПЭТВ-2 диаметром 0,1 и 0,28 мм намотанных на деревянный каркас со стороной 30 см. На каркасе расположено 20 витков с шагом намотки ≈ 4 мм.

Произведем расчет катушек по вышеперечисленным формулам и не только и сравним результаты с измеренным значением индуктивности катушек. Вычисленные значения индуктивности приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения определенной индуктивности двух катушек

	Способы расчета					
	1	2	3	4	Измеренное значение 1	Измеренное значение 2
$L, \text{ мкГн}$	259,2	200,8	299,2	203,5	240	220

Индуктивности катушек были измерены при помощи двух различных приборов. По таблице 1 видно, что разброс значений большой, около 23%. Это связано с тем, что расчет по формулам 1 и 3 носит приблизительный характер и определение значение индуктивности сводится к нахождению коэффициента по таблице. Значение по формуле 2 и подобная ей формула 4, более приближено к реальности. Измеренные значения отличаются от расчетных на 7,5 %, так как полученные катушки имеют не идеальную форму и шаг намотки.

Расчет индуктивности катушки позволяет определить величину емкости резонансного конденсатора, но подобный расчет полезен только при фиксированном расстоянии между катушками, так как влияет взаимная индуктивность на значение собственной индуктивности. В связи с этим расчет индуктивности в данном исследовании носит приблизительный характер для определения промежутка значения емкости.

5.2. Определение взаимной индуктивности двух катушек

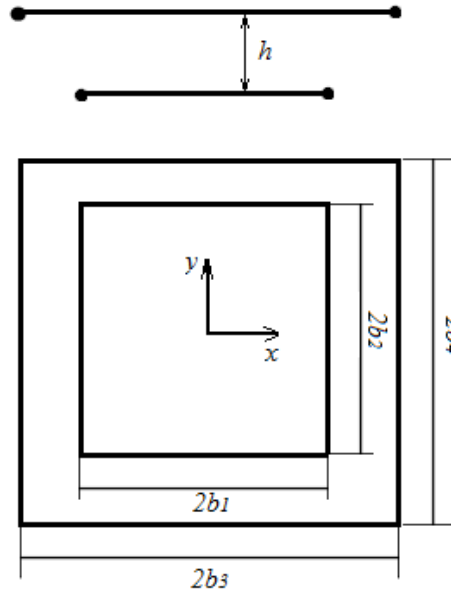


Рисунок 9 – Геометрическая модель соосных и коаксиальных прямоугольных контуров

На рисунке 9 изображена геометрическая модель двух различных прямоугольных контуров расположенных коаксиально. Взаимная индуктивность при коаксиальном расположении контуров может быть найдена по формуле

$$M = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \sum_{p=\pm 1} \left(\int_{x_1=0}^{b_2} \int_{x_2=-b_2}^{b_2} \frac{p \cdot dx_1 \cdot dx_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (pb_1 - b_3)^2 + h^2}} + \right. \\ \left. + \int_{y_1=0}^{b_3} \int_{y_2=-b_1}^{b_1} \frac{p \cdot dy_1 \cdot dy_2}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (pb_2 - b_4)^2 + h^2}} \right) \quad (4)$$

Расчет взаимной индуктивности сводится к нахождению отношений b_1/b_2 , b_4/b_2 , h/b_2 и определению отношения M/b_2 по таблице [1, с. 80]

Рассмотрим еще один способ нахождения взаимной индуктивности двух прямоугольных контуров представленных на рисунке 10.

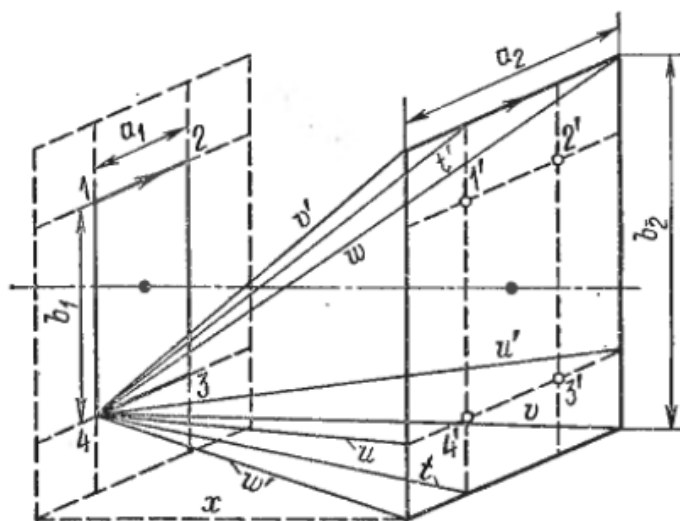


Рисунок 10 – Геометрическая модель соосных и коаксиальных контуров

Формула для определения взаимной индуктивности имеет вид:

$$\begin{aligned}
 M = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot & \left[(a_1 + a_2) \ln \left(\frac{a_1 + a_2 + 2v t'}{a_1 + a_2 + 2\omega t} \right) - \right. \\
 & - (a_2 - a_1) \ln \left(\frac{a_2 - a_1 + 2\omega' t'}{a_2 - a_1 + 2v' t} \right) + (b_1 + b_2) \ln \left(\frac{b_1 + b_2 + 2v' u'}{b_1 + b_2 + 2\omega u} \right) - \\
 & \left. - (b_2 - b_1) \ln \left(\frac{b_2 - b_1 + 2\omega' u'}{b_2 - b_1 + 2v u} \right) - 4(v - \omega + v' - \omega') \right] \quad (5)
 \end{aligned}$$

Обозначения в данной формуле ясны из рисунка 3

5.3. Собственная емкость и активное сопротивление квадратного контура

В многовитковом квадратном контуре между витками помимо магнитного поля, присутствует также электрическое поле, которое оказывает влияние на собственную емкость катушки. Величина собственной емкости зависит от размера катушки и типа намотки. Собственную емкость однослойных квадратных катушек можно рассчитать по формуле:

$$C_0 \approx 3.9685 \cdot 10^{-13} \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{400c}{\pi}\right)^4}{100l}} \quad (6)$$

где, c – сторона квадратной катушки, м;

l – длина обмотки, м.

Реальная катушка обладает не только индуктивностью, но и некоторым активным сопротивлением, обусловленным потерями энергии в обмотке катушки. Прямоугольный контур кроме индуктивного сопротивления обладает так же активным сопротивлением, обусловленным потерями в проводнике на нагрев. Базовые потери в проводнике характеризует сопротивление проводника постоянному току, рассчитываемое по формуле

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{S} \quad (7)$$

где, ρ – удельное сопротивление металла, Ом м;

l – длина провода, м;

S – поперечное сечение провода, м².

На высоких частотах наблюдается неравномерное распределение электрического тока по сечению проводника, так называемый скин-эффект. В результате скин-эффекта ток сосредоточен в тонком поверхностном слое, толщина которого определяется по следующей формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (8)$$

Сопротивление проводника переменному току высокой частоты растет при росте частоты, так как глубина проникновения уменьшается. Вводится понятие коэффициента скин-эффекта E , показывающее во сколько раз сопротивление на определенной частоте выше сопротивления постоянному току.

$$R_{AC} = R_{DC} E = R_{DC} \frac{r^2}{2r\delta - \delta^2} \quad (9)$$

где, r – радиус проводника, м.

5.4. Коэффициент связи и добротность катушек

Взаимодействие контуров оценивается коэффициентом связи K , в общем случае который определяется соотношением

$$K = \frac{X_{CB}}{\sqrt{X_1 X_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{E_2}{E_{2_{\max}}} \quad (10)$$

Коэффициент связи показывает, какую часть электродвижущая сила, наведенная во втором контуре, составляет от предельной Э.Д.С., которую

способен навести первый контур. При индуктивной связи, коэффициент K показывает, какая часть потока первичной катушки L_1 пронизывает катушку L_2 .

Мощность, передаваемая из первичного контура во вторичный, зависит не только от коэффициента связи, но и от добротности контуров.

$$Q_L = \frac{\omega L}{R} \quad (11)$$

Добротность катушки – значение, представляющее собой отношение индуктивного сопротивления катушки к активному, чем больше добротность катушки, тем меньше потери в ней.

5.5. Схема замещения двух связанных контуров

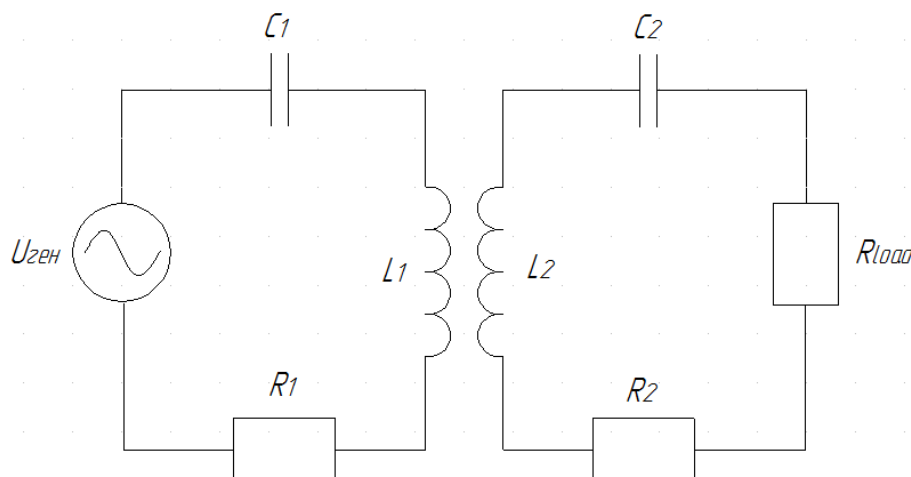


Рисунок 11 – Система индуктивно связанных контуров

Рассмотрим процессы, происходящие в связанных контурах при индуктивной связи, рисунок 11. В первичный контур включен генератор переменного тока, под действием напряжения $U_{ген}$ в контуре протекает ток I_1 , который проходя через катушку L_1 создает переменную э.д.с. самоиндукции E_{L1} .

Часть магнитного потока, создаваемого током I_1 в катушке L_1 , пересекает витки катушки L_2 вторичного контура. За счет этого в катушке L_2 возбуждается э.д.с. взаимной индукции E_2 . Под действием этой э.д.с. во вторичном контуре протекает ток I_2 . За счет тока I_2 в катушке L_2 создается э.д.с. взаимной индукции E_1' в катушке L_1 , которая влияет на первичный контур.

Схема замещения двух связанных контуров представлена на рисунке 12.

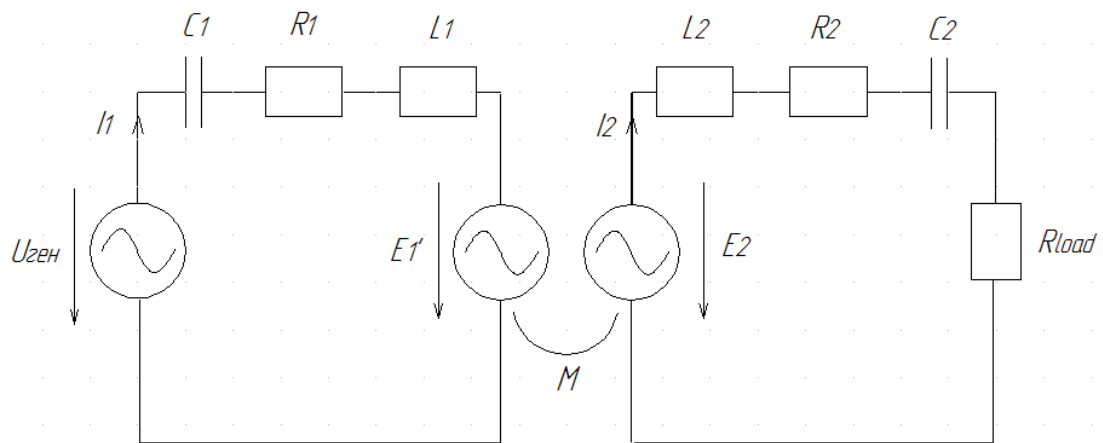


Рисунок 12 – Схема замещения связанных контуров

Введем понятие вносимого сопротивления, чтобы учесть воздействие вторичного контура на первичный

$$\Delta R_1 = \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2} (R_2 + R_{load}) \quad (12)$$

Вносимое активное сопротивление показывает, что величина зависит от частоты питающего генератора, от коэффициента взаимной индукции и параметров вторичного контура.

$$\Delta X_1 = -\frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2} X_2 \quad (13)$$

Знак минус перед выражением учитывает характер вносимого сопротивления. При индуктивном сопротивлении вторичного контура X_2 вносимое сопротивление является емкостным, и наоборот при емкостном сопротивлении вторичного контура вносимое сопротивление является индуктивным.

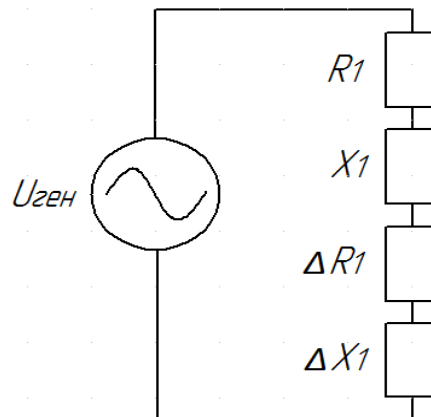


Рисунок 13 – Эквивалентная схема замещения связанных контуров

В общем случае, вносимое из вторичного контура в первичный сопротивление содержит активную и реактивную составляющие

$$\Delta Z_1 = \sqrt{(\Delta R_1)^2 + (\Delta X_1)^2} \quad (14)$$

Ток в первичном контуре в общем случае равен

$$I_1 = \frac{U_{ген}}{\sqrt{(R_1 + \Delta R_1)^2 + (X_1 + \Delta X_1)^2}} =$$

$$= \frac{U_{ген}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2} (R_2 + R_{load})\right)^2 + \left(X_1 - \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2} X_2\right)^2}} \quad (15)$$

В случае если первичный и вторичный контуры настроены на одну частоту генератора, при этом вносимое сопротивление носит чисто активный характер, т.к. $X_{C1} = X_{L1}$ $X_{C2} = X_{L2}$. При этом ток в первичном контуре равен

$$I_1 = \frac{U_{ген}}{R_1 + \Delta R_1} = \frac{U_{ген}}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_{load}}} \quad (16)$$

где отсутствует реактивная составляющая контуров.

Мощность, отдаваемая генератором системе настроенных связанных контуров, определяется выражением

$$P = I_1^2 (R_1 + \Delta R_1) = I_1^2 R_1 + I_1^2 \Delta R_1 = P_1 + P_2 \quad (17)$$

где P_1 – мощность, расходуемая в активном сопротивлении первичного контура;

P_2 – мощность, передаваемая во вторичный контур.

Так как $I_1 \omega M = E_2$ и $E_2 = I_2 (R_2 + R_{load})$, то получим формулу для мощности P_2

$$P_2 = I_1^2 \Delta R_1 = I_1^2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_{load}} = \frac{E_2^2}{R_2 + R_{load}} = I_2^2 (R_2 + R_{load}) \quad (18)$$

Коэффициент полезного действия системы связанных контуров, показывающий, какую долю составляет мощность, переданная во вторичный контур, от мощности, отданной генератором

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_2} = \frac{I_1^2 \Delta R_1}{I_1^2 R_1 + I_1^2 \Delta R_1} = \frac{\Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1} \quad (19)$$

Коэффициент полезного действия зависит от коэффициента связи между контурами, т.к. от коэффициента связи зависит величина вносимого сопротивления.

Целью любой приемной антенны является преобразование электромагнитной волны в напряжение. Рамка фактически чувствительна к магнитному полю, а не к электрическому полю (она также называется магнитной петлей). Закон электромагнитной индукции гласит, что индуцированная электродвижущая сила $E_2(t)$ в петле прямо пропорциональна времени изменения магнитного потока $\Phi(t)$ через петлю в соответствии с соотношением:

$$E_2(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (20)$$

Магнитный поток является мерой количества магнетизма через контур представленный магнитной индукцией:

$$\Phi(t) = \vec{B}(t) \cdot \vec{S} \quad (21)$$

Для синусоидального магнитного поля, однородного по поверхности контура S , амплитуда $B(t)$, спроецированная на единичный вектор \vec{n} , равна:

$$\vec{B}(t) \cdot \vec{n} = B(t) \cdot \vec{u} \cdot \vec{n}, \quad (22)$$

$$\vec{B}(t) \cdot \vec{n} = B_0 \cos(\omega t) \cos \theta \quad (23)$$

где, B_0 – сила магнитной индукции, Тл;

θ – угол между линиями поля \vec{u} и единичным вектором \vec{n} , град.

Подставляя значение магнитной индукции, получим уравнение магнитного потока для контура с N витками, каждый из которых имеет площадь A , и следовательно значение индуцированной ЭДС:

$$\Phi(t) = B_0 \cos(\omega t) \cdot \cos \theta \cdot N \cdot A, \quad (24)$$

$$E_2(t) = N \cdot A \cdot B_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos \theta \quad (25)$$

Поскольку $\omega = 2\pi f$, среднеквадратическое значение электродвижущей силы контура равно:

$$E_2 = 2\pi N \cdot A \cdot f \cdot B \cdot \cos \theta \quad (26)$$

Магнитная индукция B связана с напряженностью магнитного поля H следующим выражением:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (27)$$

Уравнение для среднеквадратического значения напряжения равно

$$E_2 = 2\pi \mu_0 \mu_r N \cdot A \cdot f \cdot H \cdot \cos \theta \quad (28)$$

6. Экспериментальное исследование системы беспроводной зарядки аккумулятора электромобиля

6.1. Описание экспериментальной установки

На рисунке 14 представлена схема экспериментальной установки по исследованию беспроводной зарядки электромобиля.

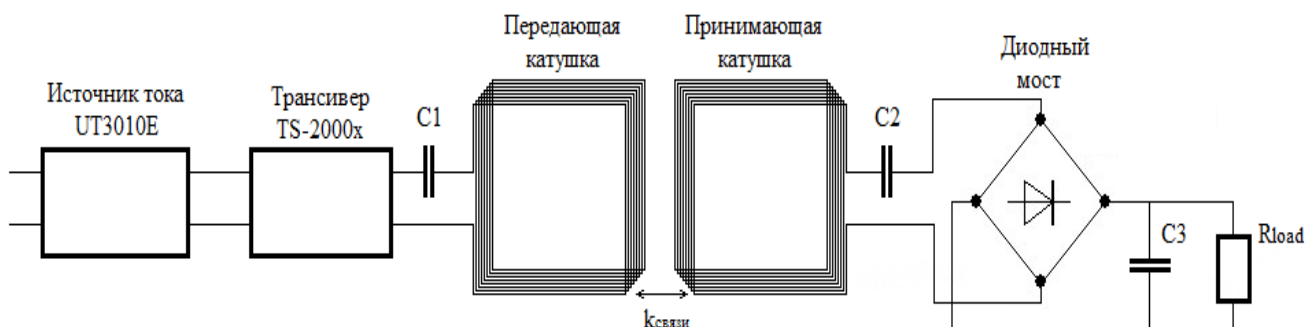


Рисунок 14 – Схема экспериментальной установки для исследования беспроводной зарядки электромобиля

Источник тока *UT3010E* преобразует переменное напряжение сети 220 В в постоянное напряжение $13,8\text{ В}$ для питания трансивера *TS-2000x*. На выходе трансивера, регулируемое высокочастотное переменное напряжение подается на последовательно подключенные резонансный конденсатор C_1 и передающую катушку. Индуцированное напряжение в принимающей катушке через резонансный конденсатор C_2 подается на выпрямитель со сглаживающим конденсатором C_3 . Постоянное напряжение подается на сопротивление нагрузки R_{load} .

В трансивере *TS-2000x* установлен высокостабильный кварцевый генератор частоты, что обеспечивает отличную стабильность частоты - $\pm 0,5ppm$. В

трансивере установлен встроенный измеритель мощности, который позволяет измерять выходную мощность передачи. Так же присутствует встроенный КСВ метр, что позволяет отследить частоту, при которой наступает резонанс в системе. Трансивер оборудован защитой от перегрузки и плавкими предохранителями, что защищает трансивер от выхода из строя. На рисунке 15 представлен внешний вид трансивера *TS-2000x* и питающий его источник постоянного тока *UT3010E*.



Рисунок 15 – Источник постоянного тока *UT3010E* и трансивер *TS-2000x*

Передающая и приемная катушки, выполнены из нескольких жил эмальпровода *ПЭТВ-2* диаметром $0,1$ и $0,28$ мм. намотанных на деревянном каркасе. Катушки располагаются на каркасах, находящихся на расстоянии от земли и выполненных без использования железных соединителей.

Резонансные конденсаторы C_1 и C_2 представляют собой набор последовательно-параллельно соединенных конденсаторов определенной емкости. В первичном контуре установлены высоковольтные конденсаторы для предотвращения пробоя. Во вторичном контуре конденсаторы переменной

емкости для проведения исследований. Диодный мост собран из четырех мощных, быстрых диодов *SF56 5A/150A*, способных пропускать исследуемый диапазон частот $1,8 - 2$ МГц. Конденсатор C_3 емкостью 1мкФ служит для сглаживания постоянного напряжения. Сопротивление R_{load} представляет собой различные вариации нагрузок.



Рисунок 16 – Внешний вид измерителя поля *NARDA NBM-550*

Для измерения напряженности используется измеритель поля *NARDA NBM-550*, представленный на рисунке 16. Широкополосный измеритель напряженности электромагнитного поля с использованием изотропных зондов подходит для измерения электрических и магнитных полей в диапазоне частот от 100 кГц до 60 ГГц. *NBM-550* применяется для проверки соответствия требованиям стандартов безопасности человека, в местах, где наблюдаются электрические и магнитные поля с высокой напряженностью.

Данная экспериментальная установка не имеет сложных для монтажа и изучения элементов и позволяет провести исследования для определения

эффективности и определения преимуществ и недостатков данной системы беспроводной зарядки электромобиля.

6.2. Определение резонансной частоты первичного контура

Определим резонансную частоту первичного контура. Трансивер имеет собственную индуктивность и емкость, что осложняет определения значения частоты резонанса, т.к. значения емкости и индуктивности трансивера не известны.

Для определения частоты резонанса воспользуемся измерителем напряженности электрического поля *NBM-550*, расположенного на расстоянии *60 см* от катушки, как показано на рисунке 17.



Рисунок 17 – Расположение катушки и измерителя для определения резонансной частоты первого контура

Емкость конденсаторов C_1 , подключенных последовательно к катушке индуктивности, равна 22нФ . Измерительный зонд расположен соосно с центром

катушки. Расстояние *60 см* выбрано с целью предотвращения превышения максимума измеряемой напряженности электрического поля *544,7 В/м*. Измеряется фактическое значение напряженности.

Полученные результаты для двух катушек приведены в таблице 3. Трансивер *TS-2000x* не имеет возможности изменения частоты в широком диапазоне, из-за внутренних настроек разрешенной частоты на территории РФ для радиостанций 3-й категории. Разрешенный диапазон *1,81-1,99 МГц*.

Таблица 3 – Результаты опыта определения резонансной частоты

<i>F, МГц</i>	<i>E, В/м</i>		<i>F, МГц</i>	<i>E, В/м</i>	
	1 катушка	2 катушка		1 катушка	2 катушка
1,81	20,64	17,54	1,91	142,2	174,3
1,82	25,16	21,15	1,92	96,5	111,9
1,83	31,53	26,01	1,93	74,9	83,4
1,84	41,07	33,56	1,94	62,2	68,1
1,85	56,76	44,26	1,95	54,5	58,7
1,86	86,03	62,58	1,96	49,2	52,4
1,87	158,2	99,23	1,97	45,53	48,21
1,88	256,1	206,1	1,98	42,9	45,17
1,89	321,6	319,2	1,99	41,03	42,99
1,90	267,3	289,9			

По данным таблицы 3 построим зависимость, представленную на рисунке 18. По зависимости видно, что резонансная частота двух катушек практически одинакова, что говорит об практически одинаковом значении индуктивности двух катушек. Так же определение резонансной частоты возможно при помощи встроенного *KCB* метра в трансивере, минимальное значение которого совпадает с пиком напряженности электрического поля измерителя *NBM-550*. Значение резонансной частоты приблизительно равняется *1,89 МГц*.

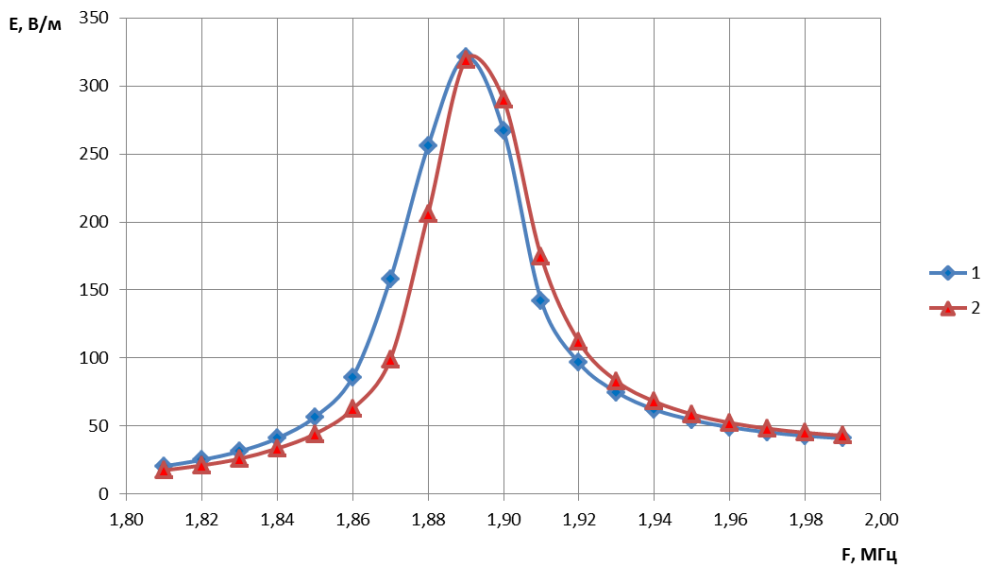


Рисунок 18 – Зависимость напряженности электрического поля от частоты

На рисунке 19 представлена зависимость напряженности электрического поля от частоты на разном расстоянии от катушки. По зависимости видно, что предел измеряемой напряженности электрического поля достигается на расстоянии *20 см* от катушки.

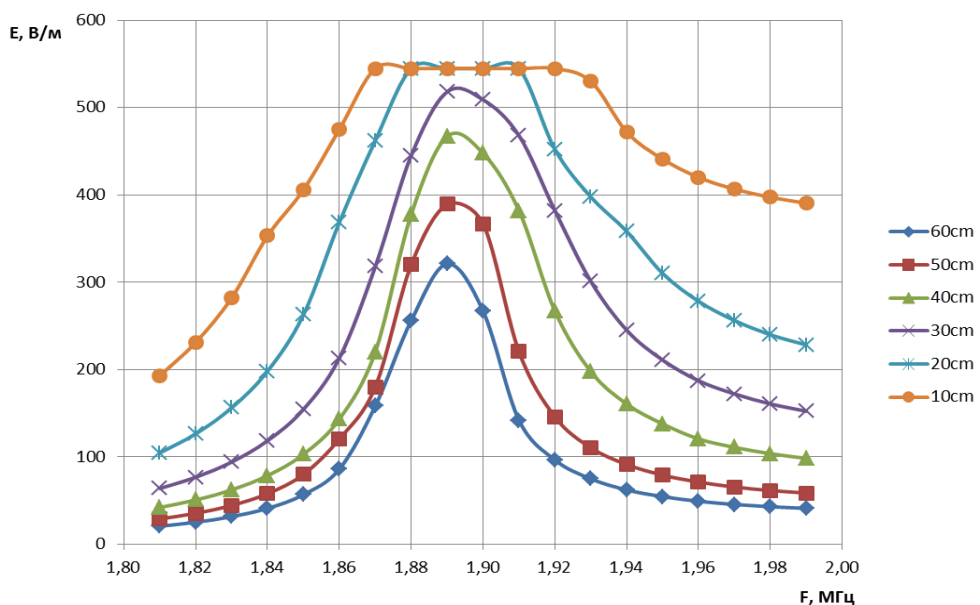


Рисунок 19 – Зависимость напряженности от частоты при разных расстояниях между катушкой и измерителем

6.3. Определение резонансной частоты вторичного контура

Чтобы определить значение емкости, при котором достигается максимальное значение параметров во второй катушке, постепенно повышаем значение емкости, подключенной последовательно с катушкой. Для измерения значения тока и напряжения во вторичном контуре используется диодный мост, выполненный на высокочастотных диодах. После диодного моста подключено сопротивление $R_{load} = 1500 \text{ Ом}$, при помощи которого измеряем значение тока I_2 и U_2 .

Опыты проведены при различных расстояниях между катушками, чтобы оценить влияние катушек друг на друга. На основе опытов построены трехмерные поверхности, по которым видно, при каком значении емкости C_2 и при какой частоте f , достигается максимум напряжения U_2 .

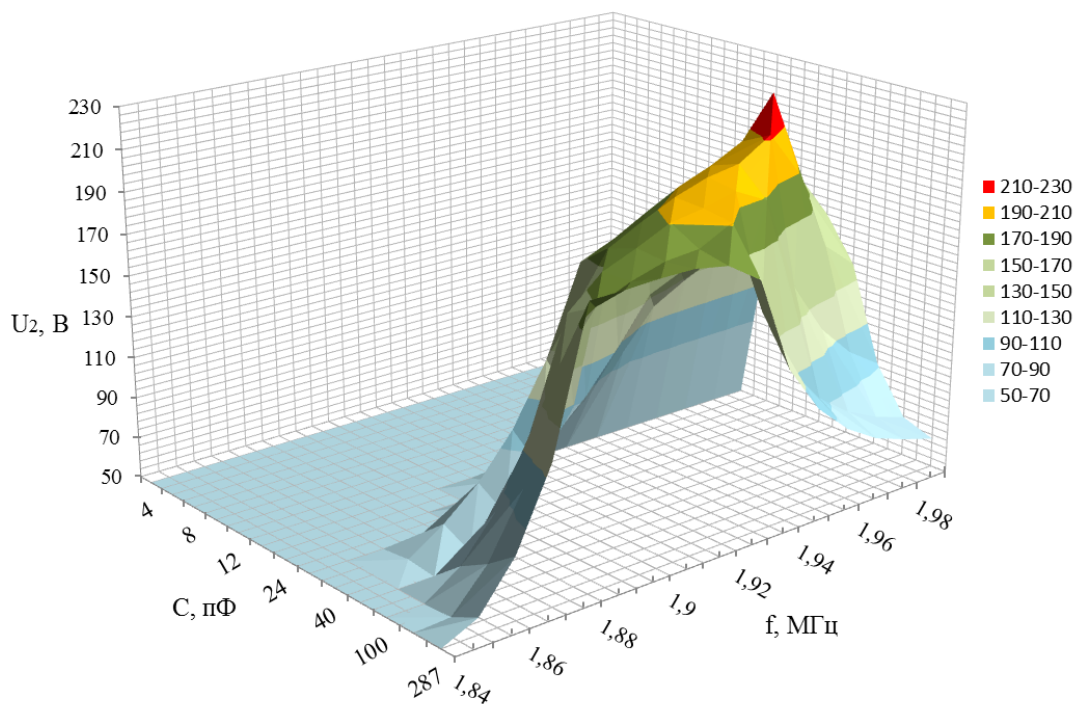


Рисунок 20 – Зависимость напряжения от частоты и емкости при расстоянии между катушками 6 см

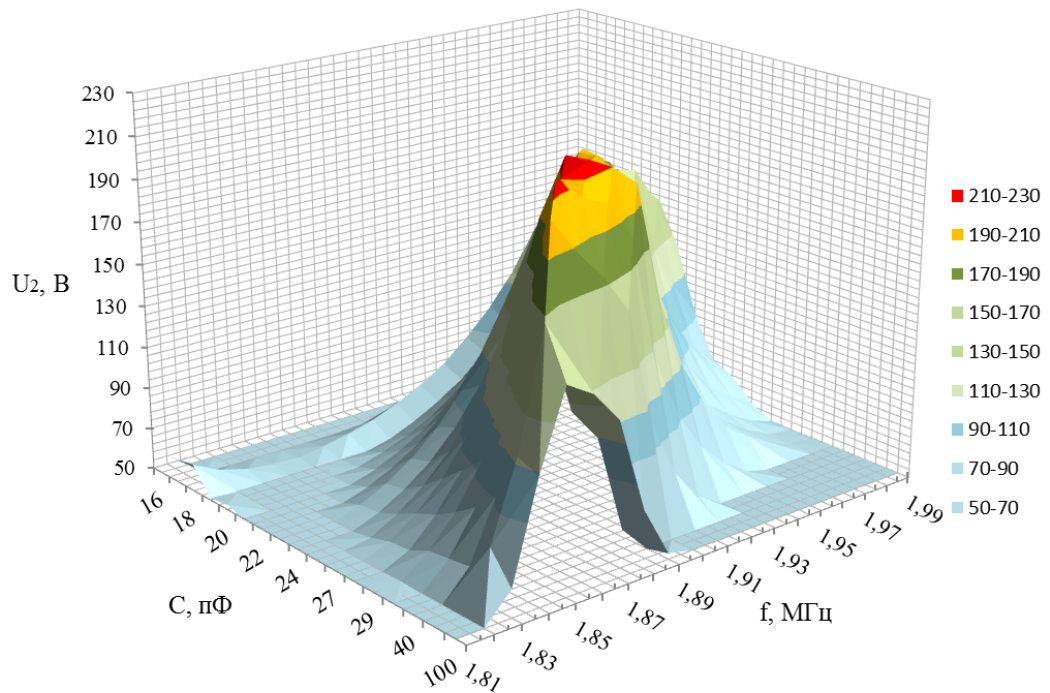


Рисунок 21 – Зависимость напряжения от частоты и емкости при расстоянии между катушками 12 см

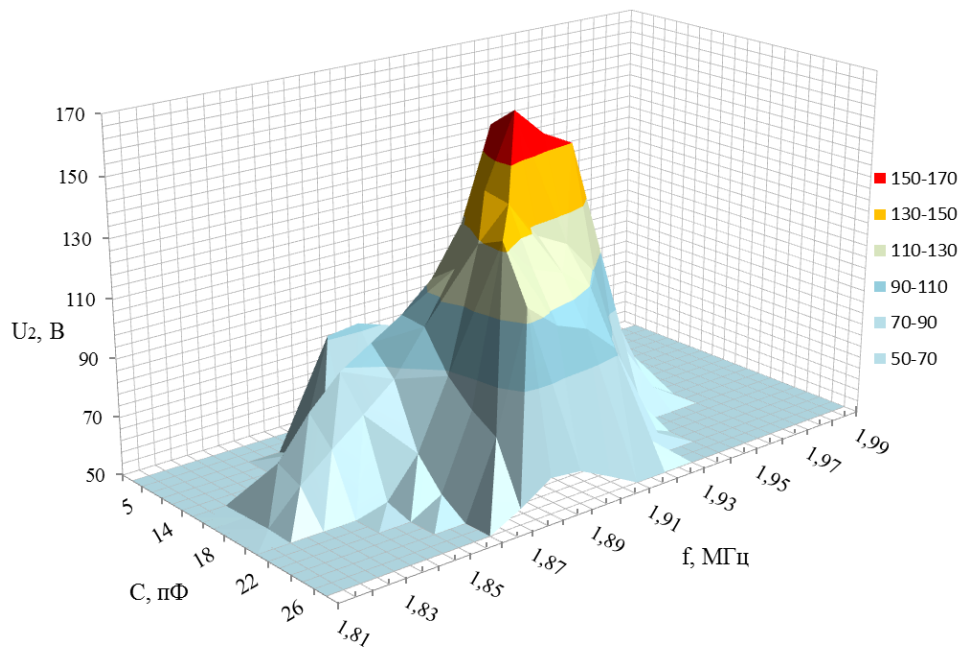


Рисунок 22 – Зависимость напряжения U_2 от частоты и емкости при расстоянии между катушками 20 см

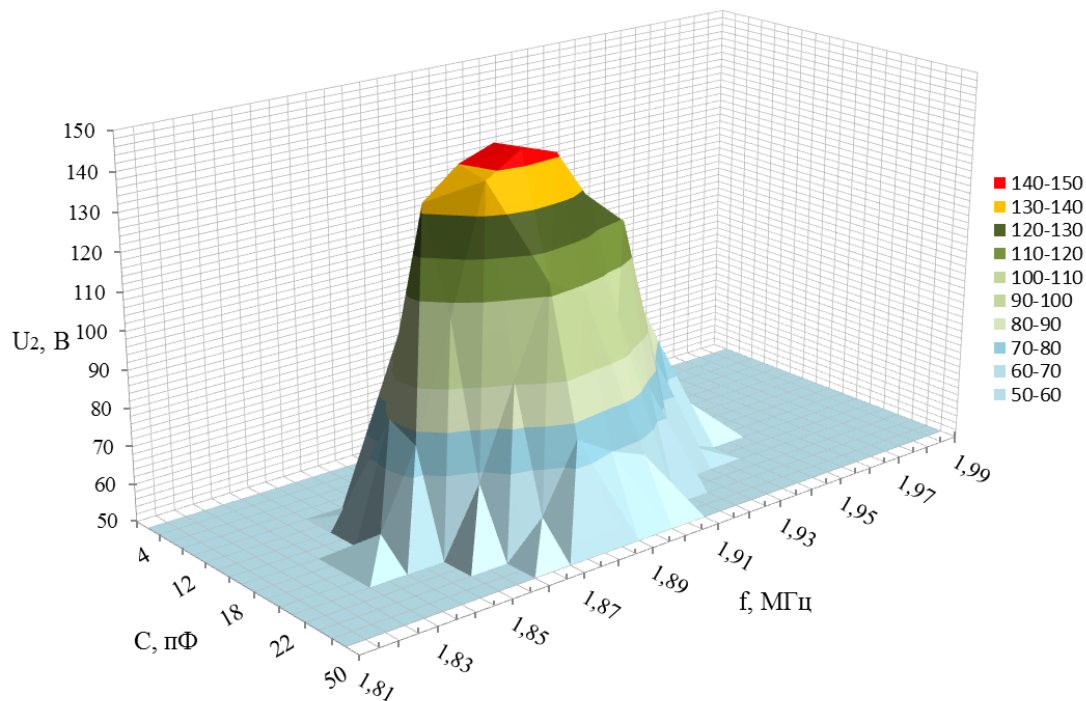


Рисунок 23 – Зависимость напряжения U_2 от частоты и емкости при расстоянии между катушками 25 см

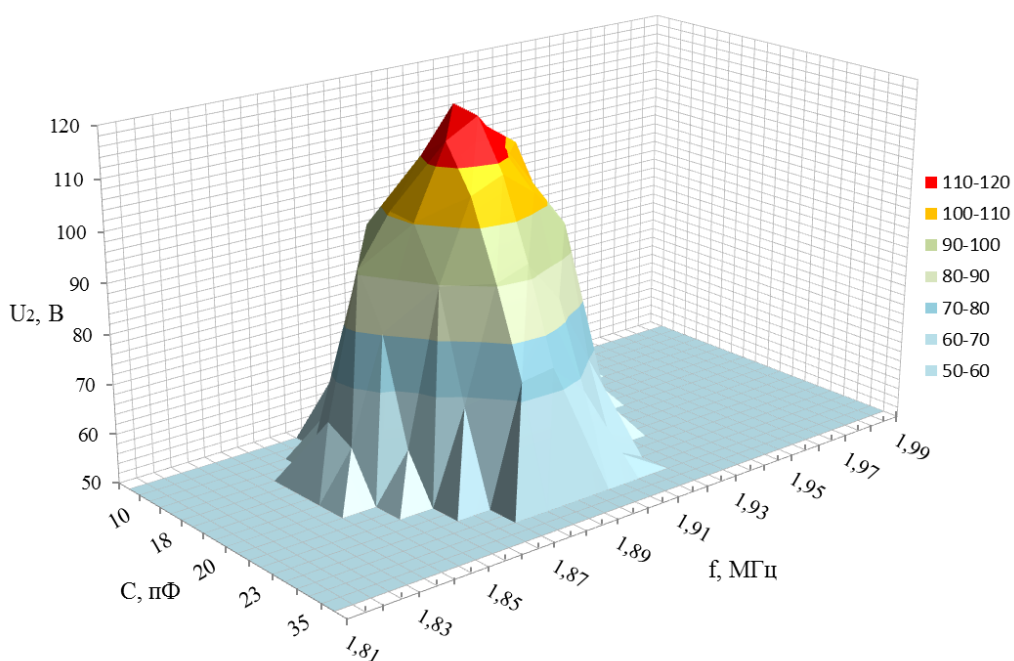


Рисунок 24 – Зависимость напряжения U_2 от частоты и емкости при расстоянии между катушками 30 см

Из проведенных опытов видно, что при различном расстоянии меняется значение емкости, при котором происходит резонанс, и изменяется частота, при которой наступает максимум выходных параметров. Емкость, при различном расстоянии между катушками меняется вследствие изменения влияния катушек друг на друга. При расстоянии большем *16 см* видно, что резонанс происходит при одинаковом значении емкости и на одинаковой частоте, вследствие слабой связи между катушками. Максимум параметров сдвигается по частоте с увеличением коэффициента связи между контурами. Значение емкости и частоты, при котором наблюдается максимум напряжения во вторичном контуре, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения емкостей и частоты при различном расстоянии

S, см	C, пФ	f, МГц
6	40	1,97
12	29	1,9
15	25	1,9
18	22	1,9
20	20	1,9
25	20	1,9
30	19	1,89
50	19	1,89

Значения емкости и частоты резонанса при расстоянии меньше *6 см* измерить не удалось, т.к. резонанс сдвигается за пределы допустимого изменения диапазона частот. Чтобы настроить систему на резонанс при расстоянии меньше *6 см*, требуется изменить емкость первичного контура. В системе беспроводной зарядки электромобиля близкие расстояния исключены, т.к. первичная катушка находится внутри дорожного полотна, а вторичная находится на некотором расстоянии от земли на автомобиле. Поэтому близкие расстояния не рассматриваются.

Для того чтобы убедиться, что в системе действительно наступает резонанс, построим зависимость напряжения U_2 от частоты f при наличии емкости и её отсутствии во вторичном контуре. Зависимости при расстоянии 6 и 30 см представлены на рисунке 25.

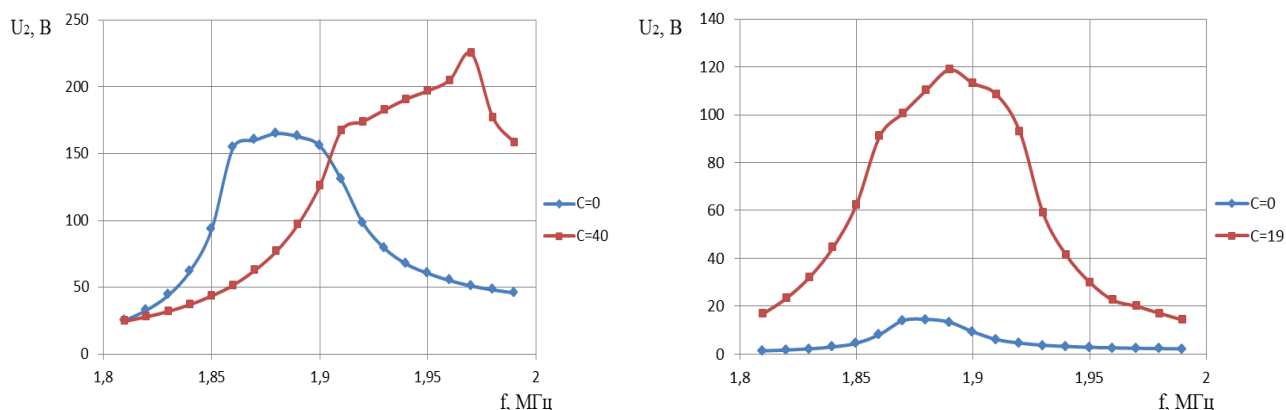


Рисунок 25 – Зависимость напряжения U_2 от частоты f при наличии емкости и отсутствии

Из рисунка 25 видно, что без емкости во вторичный контур передается энергии меньше чем при её наличии. При уменьшении расстояния между катушками, различие, между передаваемой энергией с наличием емкости и без, снижается.

6.4. Резонансные кривые двух связанных катушек

Система контуров при изменении частоты трансивера изменяет свои свойства. Чтобы оценить свойства контуров служат резонансные кривые, которые являются зависимостями тока или напряжения от частоты. Форма резонансных кривых зависит от степени связи между катушками.

При слабой связи, меньше критической, во вторичный контур передается меньше мощности отданной трансивером. Вторичный контур мало влияет на

первичный, вследствие вносимое сопротивление мало. Ток I_1 уменьшается при увеличении связи.

При сильной связи, больше критической, во вторичный контур передается больше мощности, в отличие от слабой связи, при этом реакция на первичный контур велика. При сильной связи резонансная кривая принимает вид двугорбой зависимости. Это связано с тем, что вносимое сопротивление носит разные характеры и эквивалентное сопротивление контура при увеличении частоты меняется с активного на индуктивное и с активного на емкостное.

Ток I_2 вторичного контура изменяется не только из-за сопротивления вторичного контура Z_2 , но и благодаря изменению тока в первичном контуре I_1 . Вследствие чего при изменении связи между контурами, изменяется не только резонансная кривая тока I_1 , но и тока вторичной катушки I_2 .

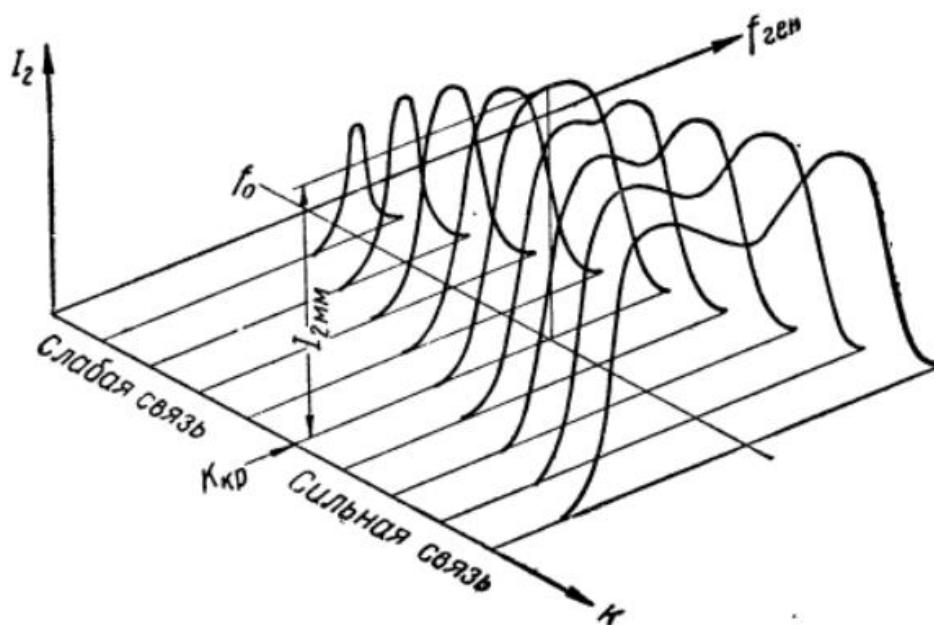


Рисунок 26 – Зависимость формы резонансной кривой тока I_2 от коэффициента связи

При слабой связи резонансная кривая тока вторичного контура I_2 , подобна тока I_1 , но при увеличении связи, ток I_2 увеличивается, так как наводимая ЭДС E_2 возрастает. При сильной связи резонансная кривая тока I_2 ведет себя идентично с первичным контуром. На рисунке 26 представлена зависимость формы резонансной кривой тока вторичной катушки от коэффициента связи между катушками.

Так как проблематично построить резонансные кривые для первичного контура из-за сложности измерения высокочастотного тока и напряжения, построим резонансные кривые для тока приемной катушки.

Для построения резонансных кривых выставим значение емкости конденсаторов для расстояния 30 см. и постепенным уменьшением расстояния между катушками зафиксируем значения тока в доступном частотном диапазоне. Полученные резонансные кривые представлены на рисунке 27.

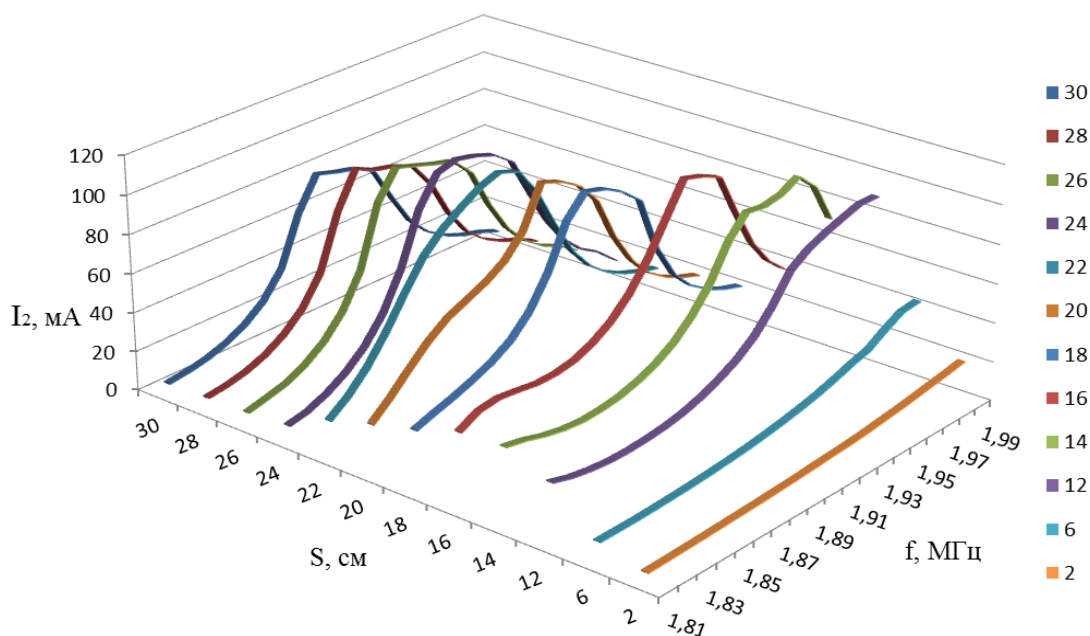


Рисунок 27 – Экспериментально полученная зависимость формы резонансной кривой тока I_2 от коэффициента связи

По зависимости, представленной на рисунке 27 видно, что с уменьшением расстояния и, следовательно, увеличением коэффициента связи, постепенно увеличивается ток. При расстоянии 16 см. происходит значительное отклонение от частоты резонанса, связано это с увеличением влияния катушек друг на друга. Образование двугорбого резонанса не происходит, связано это с неидеальными формами катушек, вследствие чего разная частота резонанса катушек и источника. Однако с уверенностью можно сказать, что расстояние, при котором коэффициент связи является критическим, приблизительно равно 16 сантиметрам.

6.5. Эффективность системы при смещении катушек

Важным фактором, определяющим эффективность системы беспроводного заряда электромобиля, является смещение катушек относительно друг друга. Связано это с трудностью парковки электромобиля на подзарядку аккумулятора так, чтобы катушки располагались соосно.

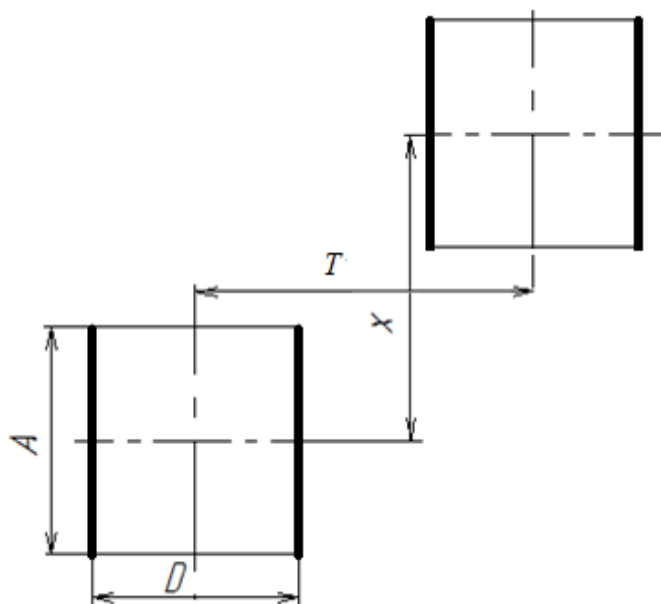


Рисунок 28 – Схема эксперимента по смещению катушек

На рисунке 28 представлена схема эксперимента, на расстоянии $X=18$ см между катушками при сопротивлении нагрузки 1500 Ом. Выставив емкость C_2 так, чтобы величина тока I_2 была максимальной, сместим катушки друг относительно друга вправо и влево на расстояние $T=30$ см.. Полученные результаты представлены на рисунке 29.

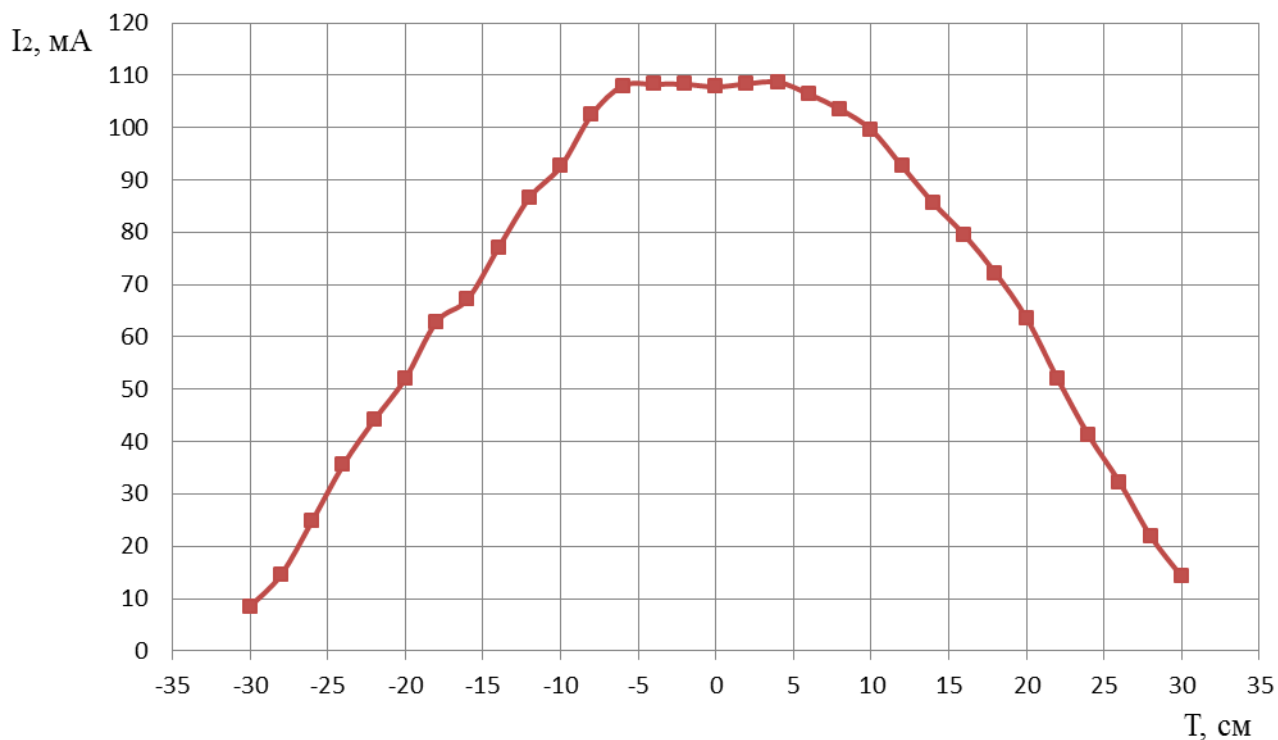


Рисунок 29 – Зависимость тока I_2 от смещения относительно центров катушек

По зависимости можно сделать вывод, что смещение, около 5 см от соосного расположения, не влияет на эффективность системы, дальнейшее увеличение смещения снижает выходные параметры. При смещении 30 см., когда катушки выходят за рамки своих размеров, эффективность сводится практически к нулю.

На графике представлены значения максимального тока I_2 при различных частотах, разброс частот приблизительно $0,2$ МГц от частоты резонанса $1,89$ МГц.

В ходе опыта, замечена закономерность: при смещении приемной катушки вправо от передающей, резонансная частота, при которой наблюдается максимум выходных параметров, смещается в большую сторону $> 1,89 \text{ МГц}$, а при смещении влево, в меньшую сторону $< 1,89 \text{ МГц}$.

На основе проведенного опыта можно сделать вывод, что смещение на 16% от соосного расположения катушек с размерами каркаса 30 см., не оказывает влияние на передаваемую мощность в данной системе. Учитывая, что при реально работающем устройстве, катушки будут иметь большие размеры, чем испытываемые, эффективность системы с небольшим отклонением катушек, при постановке электромобиля на заряд аккумуляторов, снижаться не будет.

6.6. Эффективность системы при расположении преграды между катушками

Так же, немаловажным фактором, определяющим эффективность системы беспроводного заряда электромобиля, является расположение катушек внутри дорожного полотна. Это необходимая мера для предотвращения повреждения, загрязнения, передающей катушки, а так же защита от возможного повреждения колесом электромобиля катушки. Предположительно, передающая катушка будет располагаться на минимально возможном расстоянии от поверхности дороги, под бетонной стяжкой или тротуарной плиткой.

В опыте, для исследования эффективности передачи энергии используется преграда в виде керамической плиты. При расстоянии между катушками 18 см располагается преграда с разной толщиной. Результаты опыта представлены на рисунке 30.

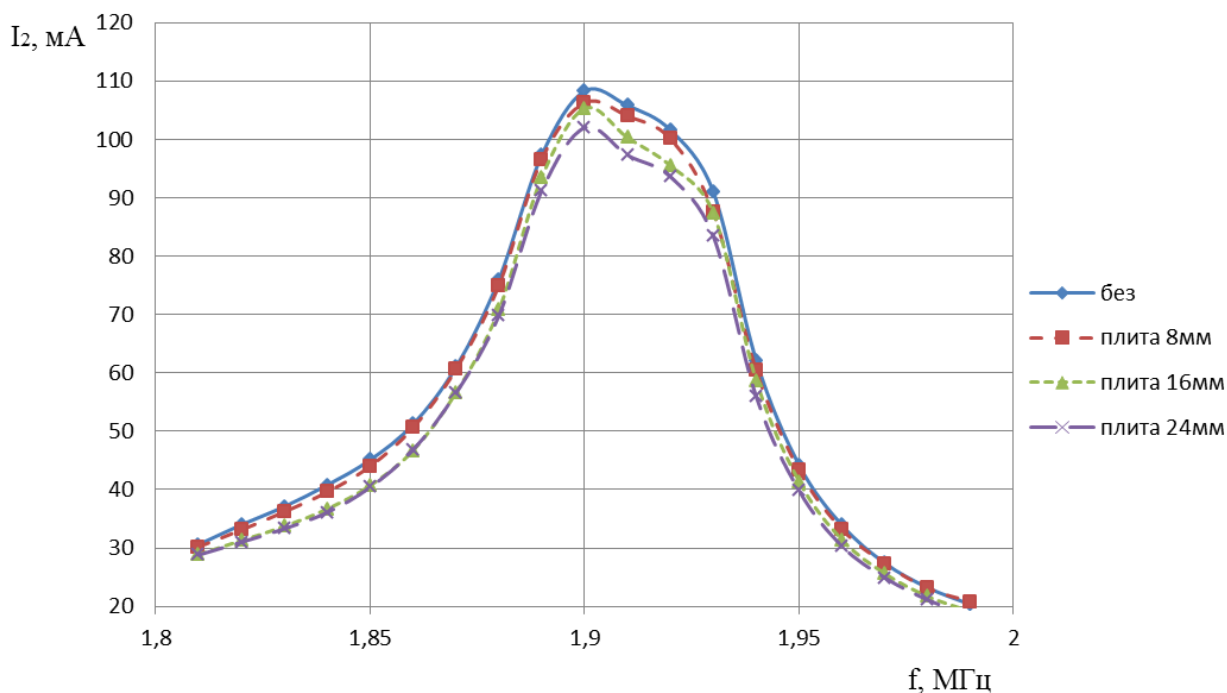


Рисунок 30 – Зависимость тока нагрузки I_2 от частоты f при расположении керамической преграды между катушками

По зависимости видно, что при наличии преграды в виде керамической плиты, эффективность снижается незначительно. При толщине плиты 8 мм., эффективность снижается на 1,8%, а при толщине 24 мм. на 5,8%. Данные потери – это необходимая мера для предотвращения повреждения системы беспроводной зарядки электромобиля.

Рассмотрим случай попадания металла между передающей и принимающей катушками. Такой случай возможен, т.к. на городских улицах всегда присутствует мусор в виде металлических изделий. На рисунке 31 представлена зависимость при частичном 50% и практически полном 80% перекрытии катушек листом железа.

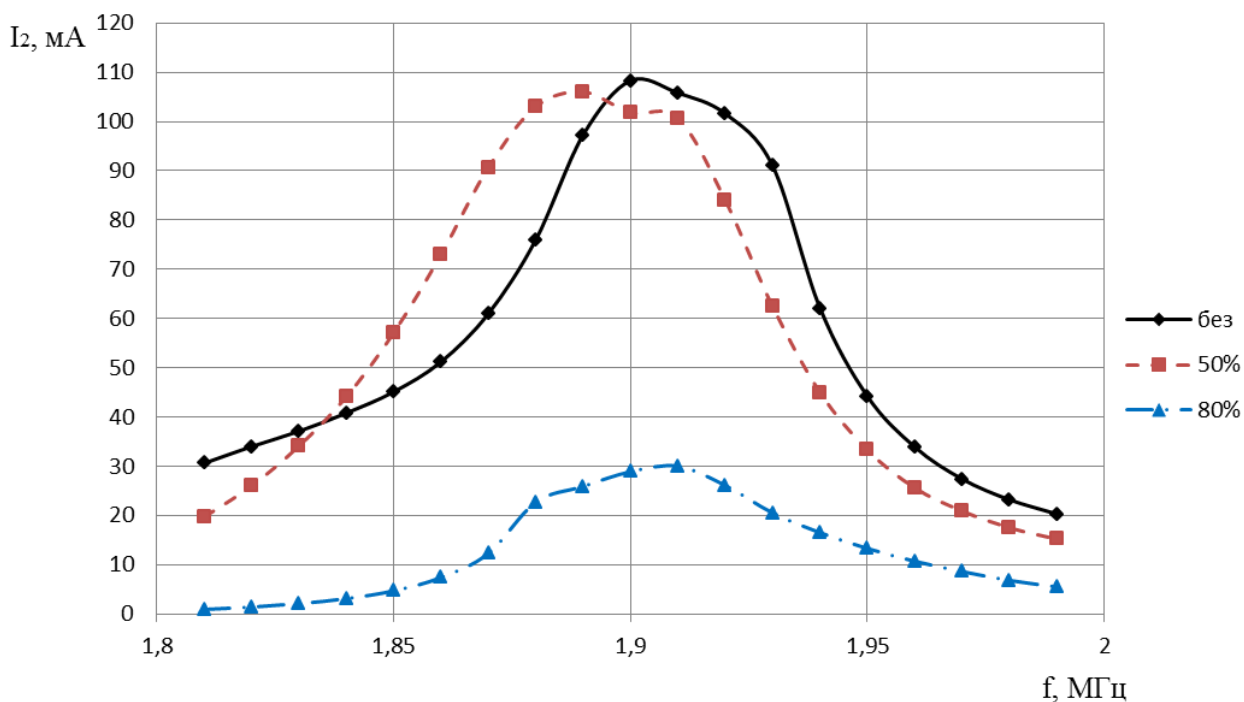


Рисунок 31 – Зависимость тока нагрузки I_2 от частоты f при расположении железной преграды между катушками

Из полученной зависимости следует, что при частичном перекрытии эффективность снижается незначительно на $2,1\%$, но изменяется частота резонанса, возможно, это связано с эффектом, наблюдаемым ранее при смещении катушек. При практически полном перекрытии, эффективность снижается значительно на $73,3\%$.

Так же немаловажным фактором, влияющим на эффективность системы, является наличие металла за передающей катушкой. Такой случай возможен, при пролегании в месте заложения катушки, металлических труб, металлического мусора и т.п. Зависимость тока нагрузки I_2 от частоты при расположении металла за передающей катушкой представлена на рисунке 32.

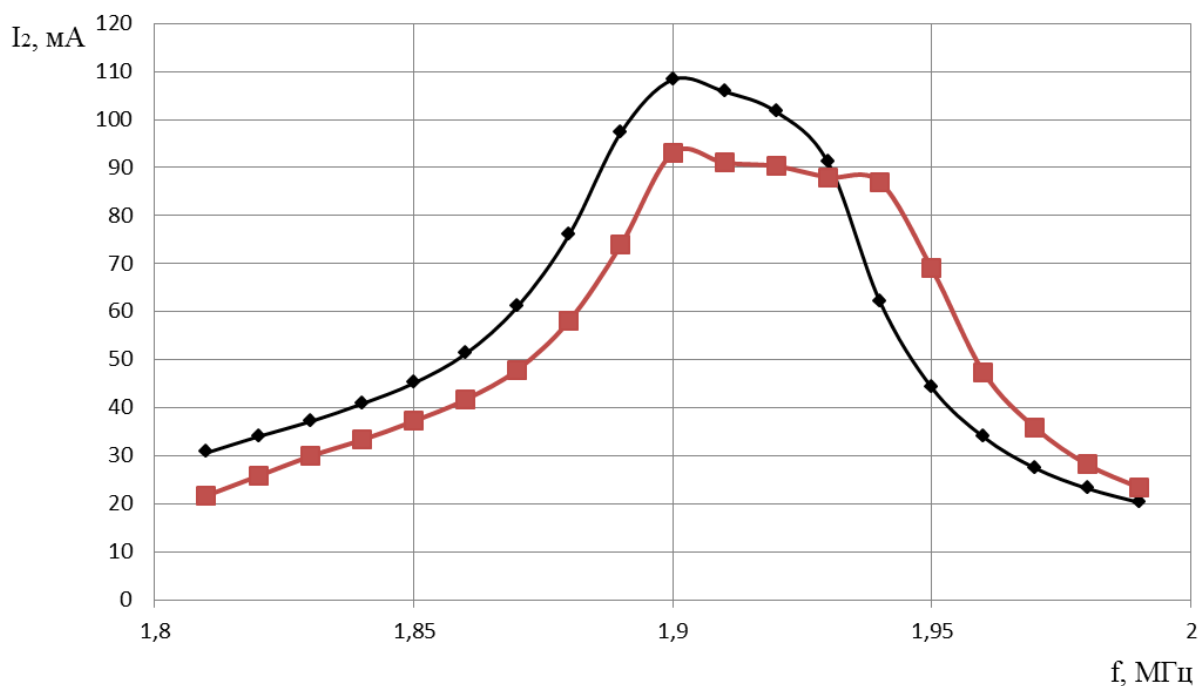


Рисунок 32 – Зависимость тока нагрузки I_2 от частоты f при расположении железной преграды перед передающей катушкой

По зависимости видно, что влияние на эффективность системы оказывает наличие металла не только между катушками, но и за передающей. Эффективность в данном опыте снизилась на $14,1\%$, что значительно снижает общую эффективность.

По проделанным опытам можно сделать вывод, что влияние на эффективность системы, оказывает множество факторов, которые необходимо учитывать при проектировании и установке системы беспроводной зарядки электромобиля. Больше влияние на эффективность системы, оказывает наличие металла между катушками. В проделанном исследовании использовались сплошные листы железа, соизмеримые с размерами катушек, вероятность попадания такого листа в практическом использовании системы очень мала. Как показал опыт с частичным использованием металлического листа, влияние

присутствует, но незначительное. Попадание между катушками, к примеру, железного прута и т.п., окажет минимальное снижение эффективности системы.

6.7. Вариации нагрузок в системе беспроводной зарядки электромобиля

В ранее проделанных опытах использовалась нагрузка в виде сопротивления ПЭ –15– 1500 Ом. При расстоянии между катушками 18 см, рассмотрим различные вариации нагрузок: светодиоды, лампа накаливания, сопротивления ПЭ различных номиналов. Оценим влияние различных видов нагрузки на работу системы беспроводной зарядки электромобиля.

На рисунке 33 – 34 представлены зависимость тока приемной катушки I_2 от частоты трансивера f , с разными номиналами сопротивлений ПЭ.

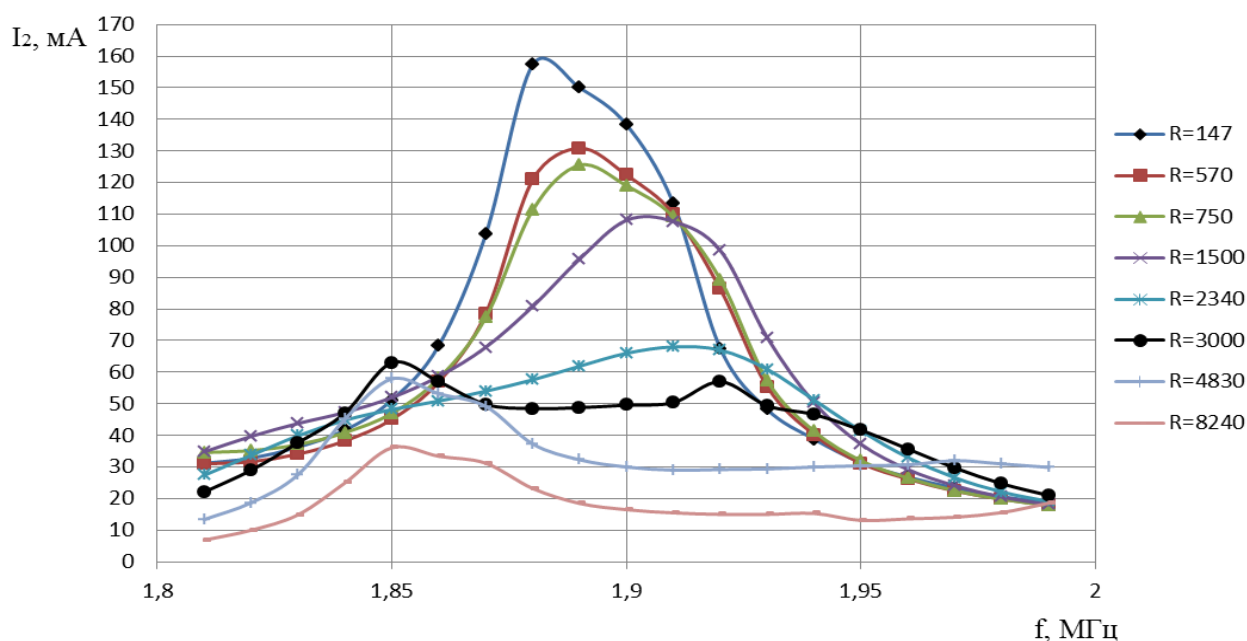


Рисунок 33– Зависимость тока нагрузки I_2 от частоты f , при различном сопротивлении нагрузки

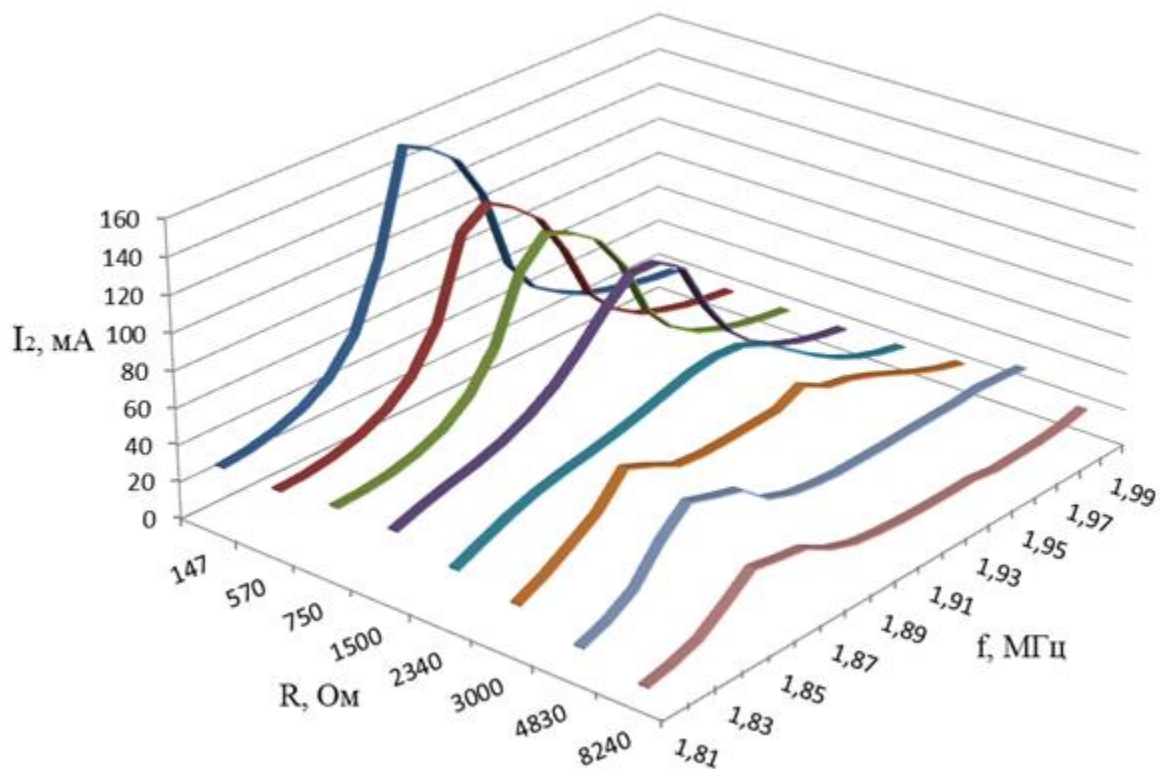


Рисунок 34 – Объемная зависимость тока нагрузки I_2 от частоты f , при различном сопротивлении нагрузки

По зависимостям видно, что различное сопротивление нагрузки меняет характер работы системы. При увеличении сопротивления, уменьшается ток нагрузки I_2 , что объясняется законом Ома, но при увеличении нагрузки изменяется и значение частоты резонанса. Объемная зависимость схожа с резонансными кривыми, рассмотренными ранее, что связано с влиянием сопротивления нагрузки на резонансную частоту. Образование двугорбого резонанса при сопротивлении $R \geq 3000 \text{ Ом}$ свидетельствует о том, что сопротивление взаимодействует с резонансной емкостью и изменяет настроенную на одну резонансную частоту систему. В таблице 5 приведены значения передаваемой P_1 и полученной на нагрузке P_2 мощности, при разном сопротивлении нагрузки.

Таблица 5 – КПД системы при разном сопротивлении нагрузки

$R, \text{ Ом}$	$P_1, \text{ Вт}$	$P_2, \text{ Вт}$	КПД, %
147	30	3,64	12,12
570	30	9,77	32,56
750	30	11,81	39,38
1500	30	17,53	58,43
2340	30	10,82	36,07
3000	30	11,91	39,69
4830	30	16,19	53,97
8240	30	10,74	35,79

Наибольший полученный КПД при сопротивлении нагрузки $R_{load}=1500 \text{ Ом}$, т.к. настройка и подбор резонансного конденсатора проводилась при этом значении сопротивления.

Нагрузка в виде лампы накаливания и светодиодов, представляет низкоомную нагрузку. Используется лампа накаливания с номинальными параметрами 230 В и 40 Вт , лампы меньшего номинального напряжения не горят, т.к. увеличивается внутреннее сопротивление лампы. На рисунке 35 приведено изображение работы системы при нагрузке в виде лампы и зависимость тока нагрузки I_2 от частоты f .

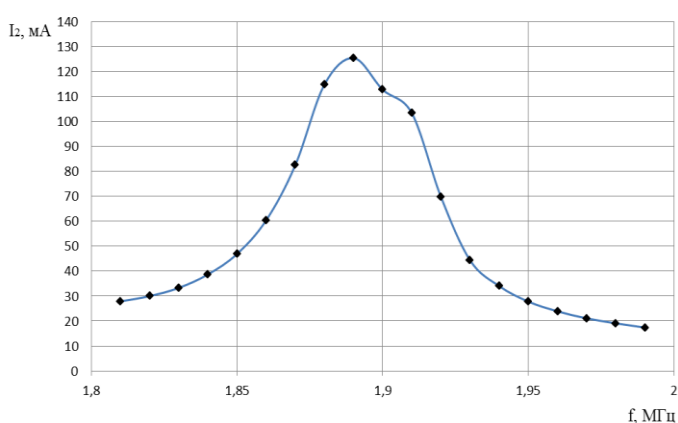


Рисунок 35 – Зависимость тока нагрузки I_2 от частоты f , при нагрузке в виде лампы

На рисунке 36 приведено изображение работы системы при нагрузке в виде последовательно соединенных светодиодов и зависимость тока нагрузки I_2 от частоты f . Светодиоды использовались с параметрами $33 В$ и $10 Вт$, четыре последовательно собранных.

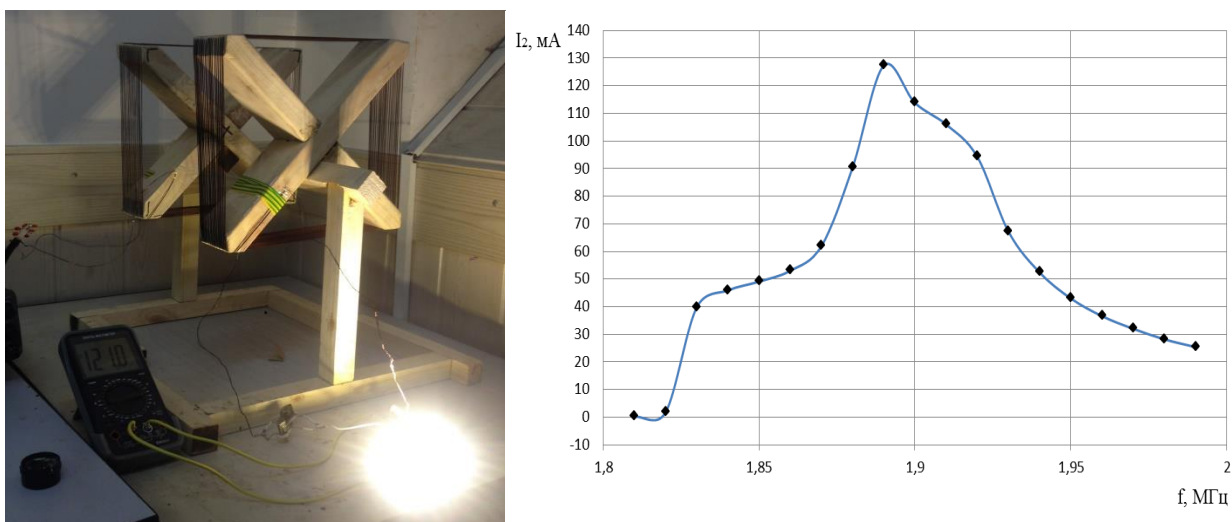


Рисунок 36 – Зависимость тока нагрузки I_2 от частоты f , при нагрузке в виде светодиодов

Полученные зависимости, при нагрузке в виде лампы и светодиодов, идентичны, отличие состоит в том, что происходит резкое увеличение тока у светодиодов, в отличие от лампы. При нагрузке в виде лампы, свечение происходит только около резонансной частоты, а при светодиодах, свечение происходит на всем промежутке частоты f и увеличение яркости происходит при приближении к резонансной частоте.

Из проведенных опытов с различными видами сопротивлений можно сделать вывод, что при разработке данной системы беспроводной зарядки электромобиля, нужно учитывать характер нагрузки, чтобы правильно настроить систему на резонансную частоту.

6.8. Общая эффективность системы беспроводной зарядки электромобиля

В трансивере *TS-2000x* встроен измеритель мощности, при помощи которого можно оценивать мощность на выходе трансивера. Проблема заключается в том, что по данному измерителю сложно оценить реальную выходную мощность и показания получаются с погрешностью 2-3 Вт. Далее показатели выходной мощности трансивера P_1 будут завышены, реальные показания меньше.

Резонансную эффективность данной системы подсчитать проблематично, т.к. не известны потери мощности в приборах, поэтому далее говорится об общей эффективности системы беспроводной зарядки. Эффективность оценивается отдаваемой мощностью трансивером и мощностью на нагрузки. Согласно формуле 19, можно определить КПД системы, учитывая, что показания измерителя мощности трансивера, есть сумма P_1 и P_2 . Во время проведенных экспериментов, представленных выше, так же снимались показания мощности P_1 и P_2 . Данные по показаниям мощности при различных расстояниях S между катушками, приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты экспериментов по определению КПД системы

$S, \text{ см}$	$C_2, \text{ нФ}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	$P_1, \text{ Вт}$	$P_2, \text{ Вт}$	КПД, %
6	40	225	150	37	33,75	91,22
12	29	223,5	149	37	32,04	86,58
15	25	174,75	116,5	37	20,39	55,10
18	22	166,2	110,8	37	18,41	49,77
20	20	160,1	106,7	37	17,09	46,18
25	20	143,9	95,9	37	13,80	37,31
30	19	118,8	79,2	37	9,41	25,43
40	19	70,5	47	37	3,31	8,96
50	19	46,8	31,2	37	1,46	3,95

На основании таблицы 6 строится зависимость $KПД$ системы от расстояния между катушками, представленной на рисунке 37.

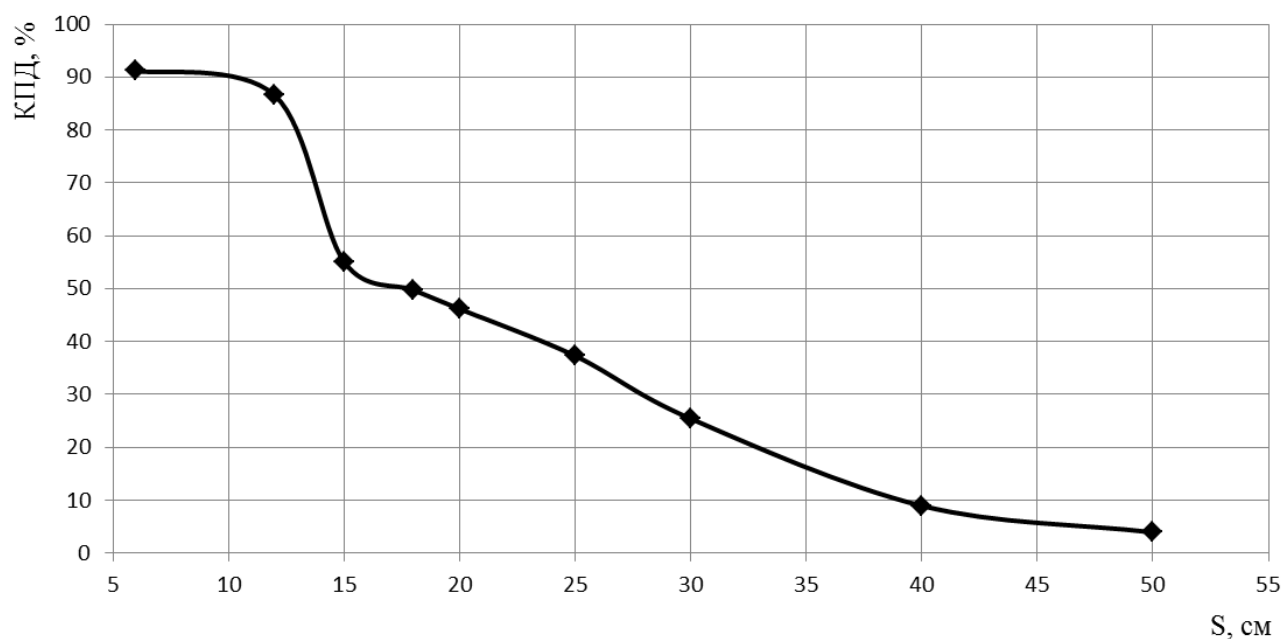


Рисунок 37 – Зависимость $KПД$ системы от расстояния между катушками

По полученным результатам видно как зависит $KПД$ системы от расстояния между катушками. При малом расстоянии снижение $KПД$ не значительное, но при достижении расстояния, при котором коэффициент связи катушек критический, происходит резкое уменьшение эффективности. Ранее отмечалось, что предполагаемое расстояние между катушками, у рабочей системы, будет около $12 - 18$ см. и по зависимости видно как сильно различаются $KПД$ в этом промежутке. У рабочей системы, требуется максимально минимизировать расстояние между катушками для получения большей эффективности. В данных опытах использовалась нагрузка $R_{load} = 1500$ Ом, максимальное расстояние, при котором происходило свечение диода, приблизительно составило 60 см.

Заключение

В рамках данной магистерской диссертации, рассмотрены существующие способы беспроводной передачи энергии. Выбран приемлемый вариант передачи энергии при помощи способа электромагнитной индукции, для системы беспроводной зарядки электромобиля. Данный способ более экономичен в плане исследования и проектирования, а так же более гибок для применения в повседневной жизни.

Для системы беспроводной зарядки электромобиля рассчитаны передающая и принимающая катушки, определены емкости конденсаторов для создания резонанса в системе передачи, а так же определены показатели эффективности и влияющие факторы. Опыты, с рассмотрением факторов влияющих на эффективность системы, показали, что система будет не эффективна без учета следующих факторов:

- расположения катушек близкого к соосному;
- отсутствие железной преграды между катушками, а так же перед передающей;
- определение реальной нагрузки.

Проведенные опыты показывают, что данная система передачи, эффективна с учетом факторов и может применяться для подзарядки электромобиля.

В разделе финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение разработан график проведения научного исследования, и рассчитаны затраты на исследование. Определена эффективность научного исследования путем анализа и оценки научно-технического уровня проекта. В результате посчитаны сравнительные интегральные показатели эффективности для проведенного исследования и исследования с другими формами катушки .

В разделе социальной ответственности были выявлены вредные проявления факторов производственной среды, опасные проявления факторов производственной среды, негативное воздействие на окружающую природную среду. Рассмотрены допустимые значения действия вредных факторов на организм человека. Рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и защита в чрезвычайных ситуациях. Рассмотрен вредный производственный фактор по допустимому электромагнитному излучению, который важен для рабочей установки беспроводной зарядки электромобиля

Приложение А

Wireless power transmission by satellites to Earth, using high power lasers and a photovoltaic cavity converter and using electromagnetic resonance method.

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Крылов Виктор Николаевич		

Консультант кафедры ЭПЭО

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭПЭО	Краснов И.Ю.	к.т.н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯЭИ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ИЯЭИ	Пташкин А.С.	к.ф.н.		

2017

Introduction

Wireless power transmission is the transfer of energy without the use of conductors in the electrical circuit. There are successful experiments of many scientists of the world by 2017. Two of them are successful experiments on the energy transmission of more than tens of kilowatts in the microwave range with an efficiency of about 40% - in 1975 in Goldstone, California and in 1997 at Grand Bassin on the island of Reunion (for a distance of more than a kilometer, studies in the field of power supply of a remote settlement without cabling).

Wireless transmission of energy can be carried out in various ways:

- Induction (small distances and small power);
- resonant (contactless smart cards and chips);
- directed electromagnetic (ultraviolet radiation to microwave).

Historically, research and development associated with wireless power transmission are listed below. It shows that the research and development started long time ago. However, the first wireless power transmission experiment was carried out by Nikola Tesla in 1899.

Historically : 1864: James C. Maxwell predicted the existence of radio waves; 1884: John H. Poynting realized the Poynting Vector to quantify electromagnetic energy; 1888: Heinrich Hertz showed experimental evidence of radio waves; 1899: Marchese G. Marconi and Reginald Fessenden invented wireless communications via radio waves; 1856-1943: Nikola Tesla conducted the 1st wireless power transmission experiment; 1889: Wardencllyfee Tower was proposed by Tesla; World War II: Microwave Energy Converter was invented; 1964: Willian C. Brown started the 1st MPT R& D in 1960s; 1940-50s: Photovoltaic Cell was built; 1958: US Solar Power Satellite (SPS) was proposed; 1968: Peter Glaser Proposed SPS System; 1978-1981: US Dept. of Energy Program was supported; 1980's: Japanese SPS System started; 1987: Canadian Project started; 1995: NASA's Fresh Look was conducted; 1999: NASA's

SERT was supported; 2012: Chinese Project to be launched (2 national wide meetings were held and white papers were submitted); 2025: Low cost model demonstration will be expected.

Wireless transmission of energy can be carried out in various ways, these methods are considered in the literature review in this dissertation.

More detailed consideration and calculations are presented for wireless power transmission by electromagnetic method for charging an electric vehicle. This method is more economical and relatively easy to implement, in comparison with other methods. The resonance method for studying the wireless charging of an electric vehicle can be widely used in various industries, medicine, etc.

1. Wireless solar power transmission by satellites to Earth

Wireless power transmission has been a topic of continued interests since the last several decades, with an emphasis made initially on long-distance high-power microwave transmission (primarily for the applications of space solar energy transmission and remote or desert area power supply), and the other emphasis made on the short-range low-power transmission (for wireless power charging systems and medical applications). For the long-distance high power transmission with potential applications to the space solar power transmission, discussions include atmospheric effects or ionospheric windows, high-power microwave generation, transmitting antennas, rectified antennas (rectennas), electromagnetic interference with existing wireless systems, and biological tissue effects on human being and animals. For the short-range low-power wireless transmission, discussion will be focused on inductive coupling effects, power grids, wireless power transmission, and medical applications.

Apparently, earlier research and development of the high-power long-distance wireless transmission system were proposed for the space solar power satellite system and its application to wireless transmission of the high power energy to the ground, as

shown in figure A.1. There were two kinds of transmissions proposed, one by microwave propagation and the other by optical or laser propagation. The laser propagation mechanism was given up and the microwave wireless power transmission was adopted since then, due to the high transmission loss of the laser waves in the foggy and also rainy seasons.

For realizing the space solar power satellite system, we expect the satellite to have the following special features:

- low attitude location;
- all weather operation;
- foldable rectenna on satellites;
- high power generation and transmission;
- pulsed wave system for military use and continued wave system for green energy power generation and controllable narrow beam width and extremely low side and back lobes for high efficiency.

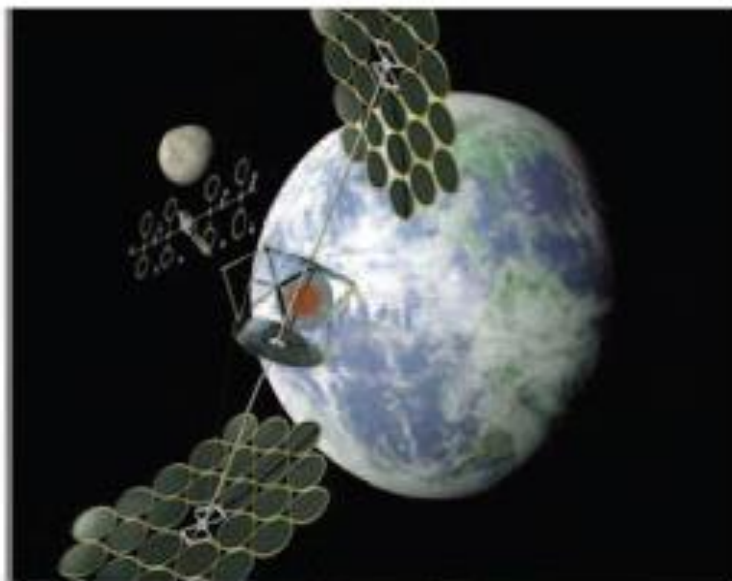


Figure A.1 – Illustration of the space solar power satellite

1.1. Atmospheric effects or ionospheric windows

To build up the system, we need to determine the operating frequencies of the microwaves that propagate through atmosphere. In the existing research, two frequencies were used, that is, 2.45 GHz and 5.8 GHz. However, more detailed research is indeed needed to find out the frequency spectrum or ionospheric window by which the microwave can propagate through the atmosphere and the ionosphere is not ionized to form the blocking layer. In addition, effects due to the rainfall layer and troposphere are also important and should be taken into the system consideration. In 1978, the Perkins and Roble model of Ohmic heating concerned the effect on the ionosphere. Although research was conducted and some useful results were collected, more research on this aspect is still necessary as the atmosphere varies with the time.

1.2. High-power microwave generation

High-power generation is one of the first important starting points for the research and development to be conducted. Two types of high power microwave generators/amplifiers are usually utilized, one is a microwave tube and the other is a semiconductor amplifier. The microwave generators/amplifiers have electric characteristics in contrary to each other. The microwave tube, for instance, a cooker type magnetron (which is very economical), can generate and amplify high power microwave (over kW) with a high voltage (over kV) imposed. The semiconductor amplifier can provide low power microwave (below 100W) with a low voltage (below fifteen volt) imposed, but is expensive. Although there are some discussions concerning generation/amplifier efficiency, in general the microwave tube has higher efficiency (over 70%) and the semiconductor has lower efficiency (below 50%). We have to choose tube/semiconductor in accordance with the requirement and budgets for the wireless power transmission system.

1.3. Transmitting and rectifying antennas

Transmitting antenna and arrays required for the long-distance high-power transmission must be of high gain, narrow beam width, and extremely low side and back lobes. Also, it is desirable to have scan registers on the beams. Many different antennas can be applied for both the wireless power transmission system, for example, horn antenna, parabolic antenna, microstrip antenna, phased array antenna or several other types of antennas. To have narrow beam and high gain for the wireless power transmission system, we usually select a large parabolic antenna, or a big array of slot antennas. For light-weight, foldable and conformal antenna arrays, the microstrip antenna arrays can be a good option as well although its gain is not so high.

Rectennas are referred to as antennas with rectifying components for receiving and rectifying microwaves in the receiving part of the entire wireless power transmission system. So, the rectenna or the rectifying antenna is an important component of the system, and the performance of the rectennas affects significantly RF-DC conversion efficiency and thus the overall efficiency of the wireless transmission system. Nonlinear receiving antenna arrays are preferable and the design must be optimized to achieve the optimum reception of the microwave energy.

1.4. Electromagnetic interference with existing wireless systems

According to literature, the existing long-distance wireless power transmission systems are operating at two microwave frequencies, at around 2.45 GHz or 5.82 GHz. These two operating frequencies have been already allocated in the international telecommunications union radio regulation to a number of radio services. At the same time, they are also designated for industrial and medical applications, for instance, the 2.45 GHz is used for radio LAN and microwave ovens while the 5.8 GHz is often used in various applications such as Radiolocation service and dedicated short-range

communications. Therefore, effects of electromagnetic compatibility and interference at these two frequencies turn to be a topic of common concerns, and more investigation is thus required to gain more physical insight of the electromagnetic compatibility and electromagnetic interference and to minimize the coupling and interference.

1.5. Biological tissue effects on human being and animals

A general public concern on high-power microwaves propagating from space onto ground is its hazard on human being and animal tissues. Since 1950, thousands of papers have been published on microwave biological effects. The scientific research focused on two aspects, one on the heating of human bodies exposed to the microwave radiation, while the other is on the biological effects on the damage of DNAs. The related exposure limits listed in IEEE standards at 2.45 or 5.82 GHz are 81.6 W/m^2 and 100 W/m^2 averaged over 6 minutes, and 16.3 or 38.7 W/m^2 averaged over 30 minutes. This level is very much lower, as compared to average solar radiation of 1000 W/m^2 . It was calculated and thus concluded that the microwave illumination to human being and animals seems to be the moon light exposed in the evening. There were many claims of low-level non-thermal effects. It seems to be cool and safe, in accordance with the calculated results and simulation data. There still exists some concern that the long-term exposure to low levels of microwaves might be unsafe and even could cause problems such as cancers. However, due to a number of uncertainties, research of this kind is still on going and it lacks of comprehensive investigations and experiments on biological effects.

Experimental tests were carried out where effects of microwave radiation on birds were explored to check the so-called “fried bird effect” at a frequency of 2.45 GHz. The slight thermal effects were observed and recorded, and it is concluded that the heating effects are probably useful for birds in winters and should be avoided in summers. Larger birds usually experience more thermal stress than smaller birds , as

expected. The overall conclusion of bioeffects is that microwave exposures are generally harmless except for the case of penetrating exposure to intense fields far above existing exposure limits.

2. Wireless power transmission using high power lasers and a photovoltaic cavity converter

PowerSphere (PS) is a high efficiency Photovoltaic Cavity Converter (PVCC) that is under development for Wireless Power Transmission (WPT) or Laser Power Beaming (LPB). The targeted power range is from 1kW to 100kW.

PowerSphere is a variation of the Photovoltaic Cavity Converter for solar applications that was developed under several DOE/NREL subcontracts and California Energy Commission grants. Respective studies have shown that a system of four different cell materials with congruent bandgaps and conjugate Rugate filters can achieve conversion efficiencies ~50% @ 500xAM1.5.

Our studies predict that a PS optimized for the single frequency of the Nd:YAG laser and equipped with fine-tuned (bandgap engineered) III-V PV cells will achieve an efficiency of 60 - 65% at 50W/cm² flux levels inside the cavity.

The PowerSphere is equipped with SunPower Si concentrator cells (HEDA312) which have enhanced Quantum Efficiency in the near IR. The cells occupy 24% of the cavity wall area. The rest is covered with high reflectance Spectralon and gold coating.

The overall project is focused on near-diffraction-limited Nd:YAG lasers operating at 1.064μm. PS is lightweight, compact and robust. Thus it provides high specific power (>1500 W/kg) and specific volume (W/ft³) in space and within the atmosphere. These advanced features of the PS and Nd:YAG systems are based on recent breakthroughs including: a) precision “Bandgap Engineering” in the near-IR, b) steady progress in increasing in the beam quality and power output of the Nd:YAG

lasers and c) significant increase in Photon Utilization Efficiency within the cavity converters.

The applications within LPB for electric conversion are diverse. Terrestrial applications include remote powering of robotic devices for hazardous duty, e.g. battle field, fire, radioactive material storage, etc. For space use NASA and NGST are studying remote powering of a Mars Rover vehicle. Within the atmosphere the applications include providing power to High Altitude Airships and continuous flight Unmanned Air Vehicles for station-keeping.

2.1. Experiment of power transmission by means Nd:YAG laser and PowerSphere

Figure A.2 shows the beam of a 200W Nd:YAG laser, it is directed at the entrance aperture of a reflective CPC concentrator without any additional optical components to control the beam shape or the flux profile. The CPC couples the light into the interior of the PowerSphere cavity through a small aperture ($D = 1.48\text{cm}$) on the cavity wall. The natural beam diameter at a distance of 3 m from the laser is approximately 2.5 cm. Figure A.3 shows the spot image of the laser beam on a molybdenum target taken with a digital IR camera.

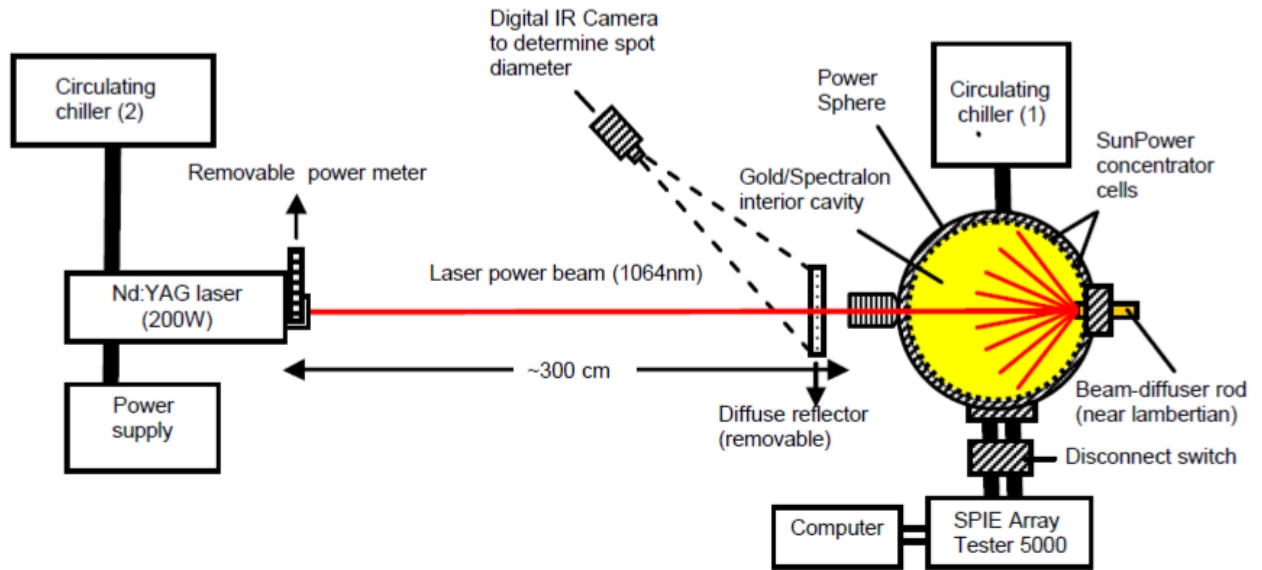


Figure A.2 – Schematic of the Laser Power Beaming test

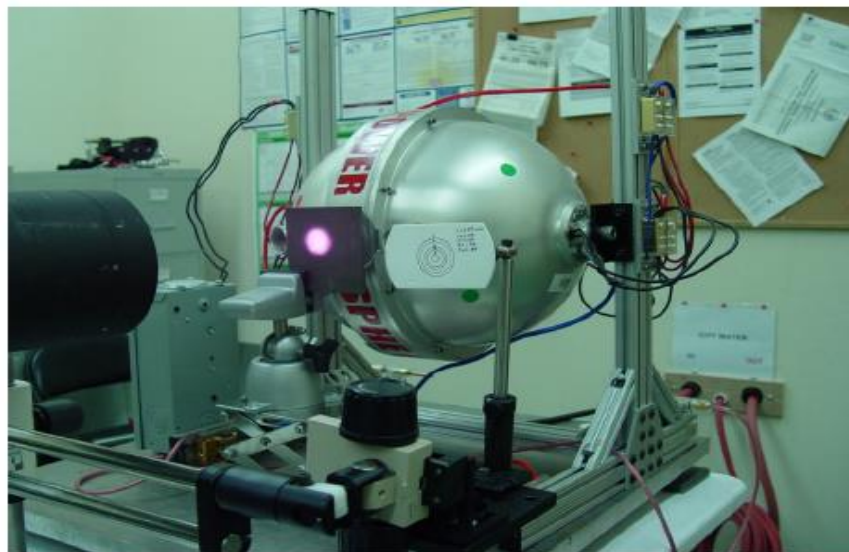


Figure A.3 – The spot image of the laser beam on a molybdenum target

At that diameter, a large portion of the beam enters the cavity without reflection and impinges directly on a beam-diffuser rod. The back-scattered light illuminates the cavity uniformly as evidenced by the flat top of the IV-characteristics.

The specific laser used in this test was a lamp pumped Nd:YAG laser operated in the CW mode with a simple flat-flat cavity resonator. The gain generator was purchased from Lee Laser in Orlando FL and the remainder of the laser assembled in-house. The maximum output power obtainable with this laser is 200W.

The interior wall of the cavity is occupied by 22 mini modules each one consisting of 12 HEDA312 cells by Sun Power. These Si concentrator cells are optimized for 500XAM1.5 solar spectrum. Because of the very low flux density inside the cavity ($.075\text{W}/\text{cm}^2$ at 160W) the Chiller (1) shown in figure A.2 has not been used.

The experiments were conducted with a SPI-ARRAY TESTER 5000. This unit is a portable system capable of measuring and recording the current and voltage characteristics of larger photovoltaic systems. The tester measures modules or arrays with output powers from 10W to 50kW. Figure A.2 shows the tester with the accompanying computer that provides the software required for operation in Microsoft Windows.

The experiments were carried out with two hemispheres (11 mini-modules each) either connected in parallel and or in series, both yielding the same results within the accuracy of the data. The cell operational temperature, the beam power and the light intensity inside the cavity were determined separately independent of the tester.

2.2. Experiment results of power transmission by means Nd:YAG laser and PowerSphere

From a PV system point of view the PowerSphere is essentially an “array” consisting of a multitude of mini modules. Therefore the efficiency we measured should be considered as an ”array” efficiency and not a “module” efficiency. Figure A.4 shows the performance characteristics of the PowerSphere obtained in series configuration. Table A.1 summarizes the measured key parameters during the testing for PowerSphere exposed to the Nd:YAG laser beam.

Table A.1 – Measured key system parameters and array efficiency

Parameter	Value
Beam Power	160W
Beam Diameter	2.5cm
Cell Temperature	410C
Optical losses in CPC	10%
V_{oc}	15.8V
I_{sc}	1.5A
FF	80%
P_{max}	18.96W
Directly measured eff.	11.9%
Eff. corrected for opt. losses and temp.(250C)	14.2%

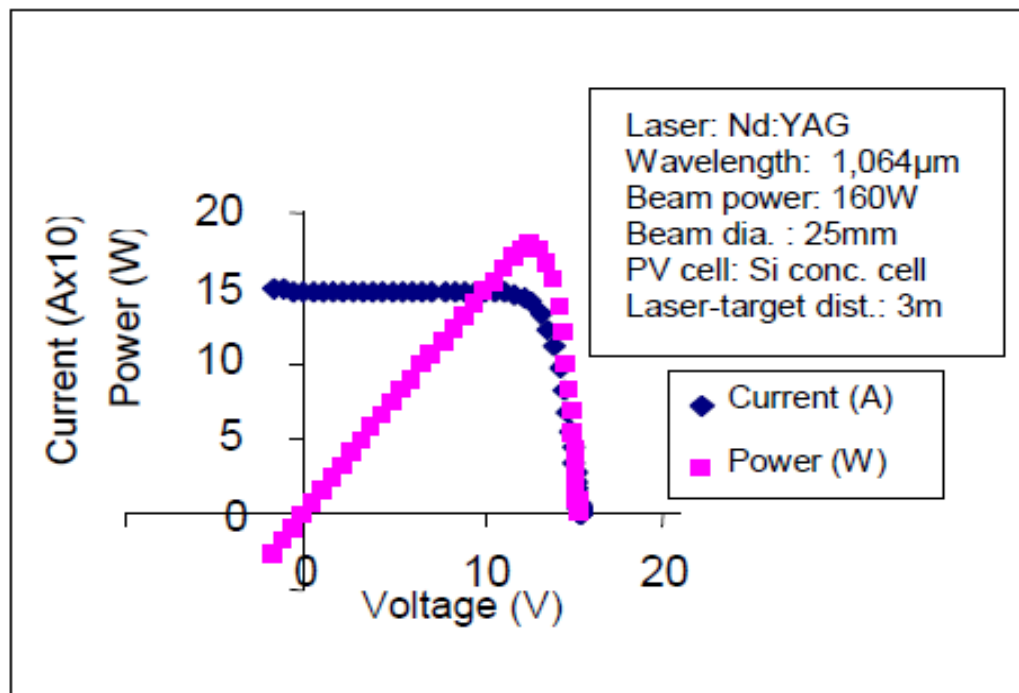


Figure A.4 – Characteristics of the PowerSphere in series configuration obtained with a 160 W Nd:YAG laser beam

3. Wireless power transmission using LC cancellation

Research on wireless power transmission technology without using a cord during charging has been attracting more attention after MIT introduced the magnetic resonance technology in 2007. Conventionally, the electromagnetic induction system requires high coupling coefficient that is difficult with long distance power transmission. But this method can be highly efficient for power transmission between 1-2m distance. Coupling coefficient of the coil becomes smaller with longer transmission distance. However, the use of the suitable capacitor generates a resonance phenomenon. The transmission power capability has been increased using the LC cancellation principle with the resonance phenomenon even if the coupling coefficient is small.

3.1. Drawbacks of electromagnetic induction without resonance

Figure A.5 shows the change in power due to change in the coupling coefficient and the load resistance. The electromagnetic induction system uses the electromotive force generated by the change in the magnetic flux that passes through the other coil. As interlinkage flux increases if the two coils are very close, coupling coefficient increases. However, the interlinkage flux decreases when the distance between the coils increases, hence the leakage inductance increases and coupling coefficient decreases. As shown in figure A.5, extractable power is significantly reduced if coupling coefficient is small. Therefore, the electromagnetic induction method can transmit enough power only at small distance range. As it is presented in graph of the coupling coefficient of figure A.5, maximum output power is apparently reduced if coupling coefficient is small. Thus if we need to transmit enough power even if coupling coefficient is small, it is necessary to apply a technique to compensate the leakage inductance.

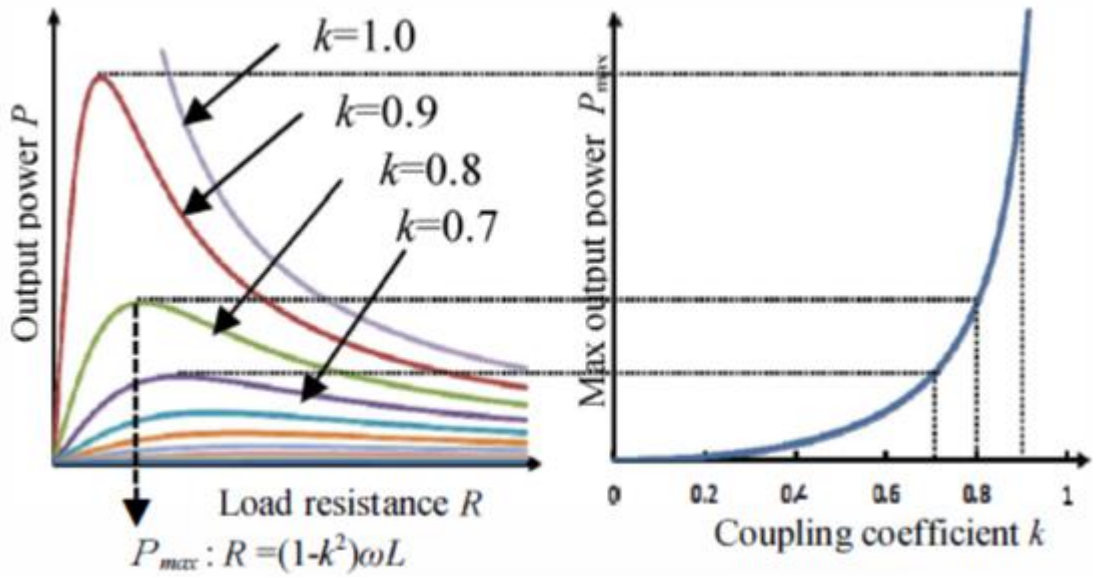


Figure A.5 – Output power characteristic

3.2. Principle of LC cancellation

When the inductance and capacitance are connected in series as shown in figure A.6 on the left, at series resonance, the voltage difference across the LC series circuit is considered zero as shown in figure A.6 on the right. However, an internal resistance exists in each component; which causes power loss. The generated voltages in both of Land C should not increase higher than their break down voltages.

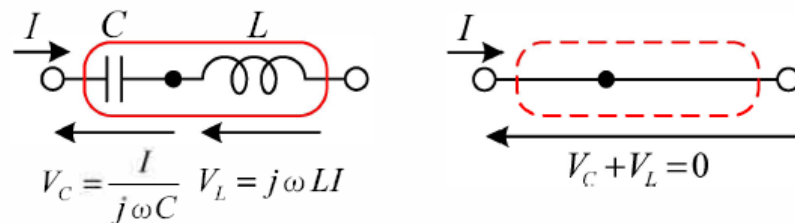


Figure A.6 – Principle of LC cancellation

3.3. Resonator efficiency and total efficiency

Figure A.7 shows an example of a wireless power transmission system. There is a need to distinguish between the overall efficiency considered of entire system and the resonator efficiency between the resonators in order to discuss the efficiency. Many technologies only focus on the resonator efficiency between the resonators in the electromagnetic resonance method. However, due to the internal resistance of the power supply circuit (the rectifier, and the inverter circuits) will result in power losses. Therefore, the overall efficiency becomes lower than the resonator efficiency. Furthermore, it is also necessary to comprehend the output power at the load as well as the overall efficiency. It is necessary to ensure high resonator efficiency between the resonators in order to increase the overall efficiency of the entire system. However, if the output power is low and overall efficiency is low, this circuit is not suitable for practical use.

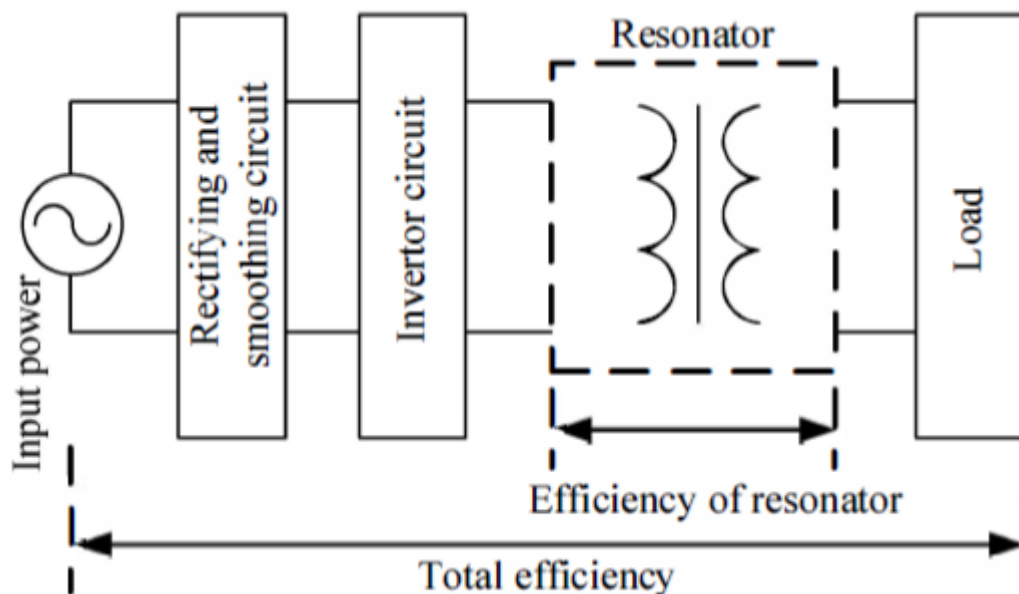


Figure A.7 – Circuit example of the overall system

4. Conclusion of literature review

Wireless solar power transmissions, some critical issues in the long-distance high-power wireless transmissions and also the short-range low-power wireless transmissions are briefly reviewed and their applications are addressed. While the applications of the long-distance high-power wireless transmissions are primarily applied to the space solar power satellites and the far-distance remote site power supplies, the short-range low-power wireless transmissions are applied to the power grid system to form a wireless power supply, the wireless charging system and also the medical sensor network and imaging systems. The topic, although classic in contents, is of many practical applications and expected to grow fast in the recent years.

The experiment results of power transmission by means Nd:YAG laser and PowerSphere successfully demonstrated free space (wireless and fiberless) power transmission in the subkilowatt range. For the demonstration we used a 200W CW Nd:YAG laser as the beam source and a Photovoltaic Cavity Converter (PowerSphere) as the receiver. At a laser-to-receiver distance of 3 meters and 160W beam strength the PowerSphere generated about 19W of DC power. The PowerSphere prototype used for this experiment was equipped with the state-of-the-art, advanced Si concentrator cells. The generation and conversion stages of the transmission processes were both stable and repeatable over long periods of time (several times 30 minutes or longer).

The reported array efficiency of 14.2% must be viewed with the understanding that: a) Si cells are not a good match for the 1064nm wavelength;

b) the flux density inside the sphere is 30% less than one sun, though the cells are optimized for 500 suns;

c) the standard AR coating for the test cells inside the PowerSphere have a reflectance of ~ 15% at 1064nm and;

d) the cell population inside the cavity is only 24% reducing the Photon Utilization Efficiency dramatically.

Taking into account these facts, the results of the experiment can be considered as satisfactory ones. The PowerSphere equipped with the advanced Si concentrator cells would convert Nd:YAG radiation into electricity at 40% efficiency.

Present PowerSphere prototype can be used up to beam power levels of 100kW with some modifications in the heat removal system. The interior cavity diameter of the present PowerSphere is 25.4cm providing a cavity area of about 2000cm². At 100kW radiant input power the flux density inside the PowerSphere reaches 50 W/cm² or 500 suns in terms of AM1.5. Assuming a conversion efficiency of 60% the respective waste heat load becomes 20W/cm². Advanced heat removal methods like micro-channel, forced liquid cooling or heat pipes have been shown to be adequate for this type of heat loads in the dense power electronics industry.

For the next near term experiments (1kW to 2kW range) we propose to use the same type of Si cells in conjunction with the next generation PowerSphere design that will increase the cell population to ~ 80%. Our program plan to optimize the PowerSphere/Nd:YAG systems include the design and development of a new, bandgap engineered cell type that matches the Nd:YAG laser frequency optimally. For the next generation PowerSphere design, equipped with frequency matched cells, our analytical model predicts an array conversion efficiency of 60% - 65%. The present laser has a low wall-plug efficiency of a few percent. For increased overall efficiency it is also important to improve the laser efficiency itself. Good progress is being made with solid state diode pumped Nd:YAG lasers.

Wireless power transmission technology using electromagnetic resonance method, considering circuit losses, is discussed in terms of efficiency and output power. The equivalent circuit of the electromagnetic is analyzed. Input power, output power, and efficiency characteristics are analyzed in terms of coupling coefficient and characteristic impedance. The input power, output power and efficiency are constant in range of large characteristic impedance. As a result, the trends of the measured and theoretical results are in good agreement with each other. Moreover, the presence of

internal and conductor resistances affects the overall efficiency. Currently, the achieved relation in this paper is used to develop a design strategy for electromagnetic resonance based on wireless power transmission systems.