

Содержание

РЕФЕРАТ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ	6
1.1. История вопроса.....	6
1.2. Способы беспроводной передачи энергии	7
1.2.1. Метод электромагнитной индукции	8
1.2.2. Метод магнитно-резонансной индукции.....	9
1.2.3. Метод электростатической индукции.....	10
1.2.4. Метод микроволнового излучения.....	10
1.3. Сферы применения беспроводной передачи энергии.....	11
1.4. Принцип действия беспроводной передачи электроэнергии на основе явления электромагнитной индукции	14
1.4.1. Индуктивно связанные элементы цепи	15
1.4.2. Резонанс в индуктивно связанных контурах.....	17
1.5. Выводы.....	22
РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КАТУШЕК В COMSOL MULTIPHYSICS	24
2.1. Создание исходной области и геометрии объектов	25
2.2. Описание математической модели объекта исследования.....	27
2.3. Расчет индуктивности и активного сопротивления катушки в Comsol Multiphysics	33
2.4. Расчет собственной емкости катушки	35
2.5. Выводы.....	36
РАЗДЕЛ 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ КАТУШКАМИ.....	37
3.1. Моделирование электромагнитных полей для катушек разной конфигурации	37
3.2. Расчет мощности в приемной катушке спиралевидной формы.....	40
3.3. Внедрение систем беспроводных технологий	42

3.4. Безопасность использования беспроводных технологий	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	46
Список литературы	48

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 49 страницы, 35 рисунков, 3 таблицы, 21 формулу, 16 источников литературы.

Ключевые слова: магнитно-резонансная индукция, беспроводная передача энергии, резонанс тока, плотность тока, векторный магнитный потенциал

Объектом исследования являются индуктивно связанные катушки различной конфигурации по типу воздушного трансформатора.

Целью работы является исследование методики беспроводной передачи энергии посредством двух взаимосвязанных катушек разных размеров и расположенных на различном расстоянии друг от друга.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время технологии беспроводной передачи электрической энергии переживают бурное развитие, связанное с огромным количеством потребителей, желающих получать энергию без проводов.

Действительно, в наш век высоких технологий трудно не найти устройства работающих беспроводным путем с помощью различного рода аккумуляторных батарей (компьютерная мышь, ноутбук, смартфон и другие интеллектуальные гаджеты). Не все аккумуляторные батареи способны питать приемник достаточно длительное время, а если это и возможно, то размеры батареи составляют слишком большие величины.

Решением данной проблемы является технологии беспроводной передачи энергии, а именно беспроводная передача энергии для зарядки аккумуляторов. В мировой практике уже на протяжении последнего десятилетия активно как развиваются, так и внедряются технологии беспроводных зарядных устройств такими зарубежными гигантами мировой индустрии в электронной сфере, как Qualcomm Incorporated, Intel, Samsung, WiTricity и множество других.

Применение беспроводных устройств не является исключением только для зарядки аккумуляторов смартфонов и ноутбуков, данный вид технологии уже успешно применяют в промышленной сфере: заряд аккумуляторов транспортных средств, имплантируемых устройств в медицине, в военной технике, в качестве источника для светодиодного освещения в помещении и др.

Принимая во внимание различные способы беспроводной передачи энергии и растущий спрос на данную технологию, производители и потребители такого рода устройств остановились на беспроводной передаче электроэнергии методом электромагнитной индукции.

В России, существующей методики по описанию работы беспроводной передачи энергии нет, поэтому важно осознание, что изучение подобной технологии является одной из основных задач в развитии импортозамещения.

РАЗДЕЛ 1. БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ

1.1. История вопроса

В конце XIX начале XX века Никола Тесла, сербский ученый и инженер, внес неоценимый вклад в мировую науку и посвятил много усилий в сфере радио и электротехники. Благодаря его теоретическим работам, а так же патентам, произошел второй этап технической революции.

Основные интересы изобретателя заключались в изучении свойств магнетизма и электричества, создании и усовершенствовании устройств, работающих на переменном токе. Большая часть его исследований была посвящена опытам по однопроводной и беспроводной передаче энергии, еще задолго до возникновения электрической сети.

Почему же передача энергии без использования проводов является заветной мечтой энергетиков со всего мира. Чтобы понять основные принципы функционирования таких систем передачи энергии, требуется рассмотреть историю данного вопроса.

Впервые опыты по беспроводной передаче энергии были продемонстрированы Николой Теслой в 1893 году на выставке в Чикаго. Он показал беспроводное освещение люминесцентными лампами в проекте Колумбовской всемирной выставки. С достижением существенных открытий в сфере радиотехники, возможность осуществления беспроводной передачи энергии увеличилась. Но, к сожалению, две Мировые войны откладывают исследования в этой области на второй план, и только в начале шестидесятых они возобновляются.

В 1964 году в США был продемонстрирован миниатюрный вертолет, получающий всю энергию по радиоволнам СВЧ-диапазона. В дальнейшем процесс исследований только ускорился, и были проведены опыты по передаче действительно больших мощностей (до десятков кВт), а также разработаны бесконтактные смарт-карты и чипы RFID (системы радиочастотной идентификации). В последние годы прогресс пошел еще

далее – был представлен первый в мире беспроводной LCD – телевизор, представленный китайской компанией Haier Group.

1.2. Способы беспроводной передачи энергии

Понятие «беспроводная передача энергии» является собирательным термином, который относится к числу различных технологий для передачи энергии с помощью электромагнитных полей. Такие технологии, прежде всего, характеризуются расстоянием, на которое они могут передавать мощность с максимальной эффективностью, а также используемым типом электромагнитной энергии: изменяющееся во времени электрические и магнитные поля, радиоволны, сверхвысокочастотные (СВЧ) излучения и видимые световые волны.

Возможные методы передачи беспроводной передачи электроэнергии представлены на рисунке 1.

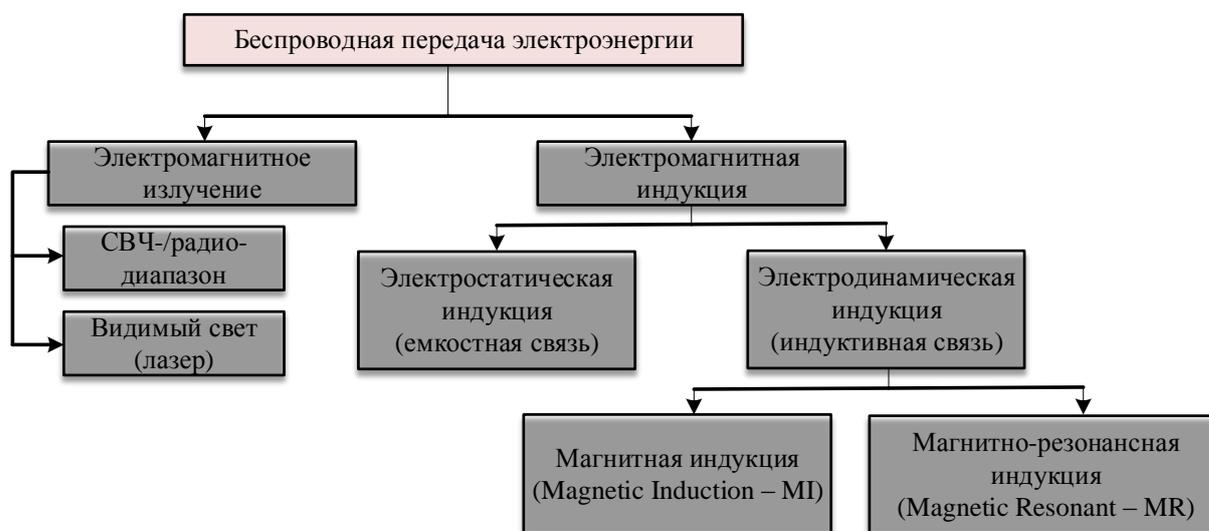


Рисунок 1 – Методы беспроводной передачи энергии

Беспроводная передача энергии касается многочисленного разнообразия сфер применения, в том числе и беспроводной зарядки аккумуляторов. В последнее время, как производитель, так и потребитель устремили свое внимание на возможность беспроводной передачи энергии в установках, нацеленных на массового потребителя, в частности, на технологию беспроводной зарядки аккумуляторов.

В общем понятии, рассматривая любой из методов беспроводной передачи энергии, можно однозначно сказать, что схема осуществления передачи энергии основана на передающем элементе (антенна или связанные катушки), подключенного к источнику питания, и принимающем элементе, подключенного на нагрузку (рис. 2).

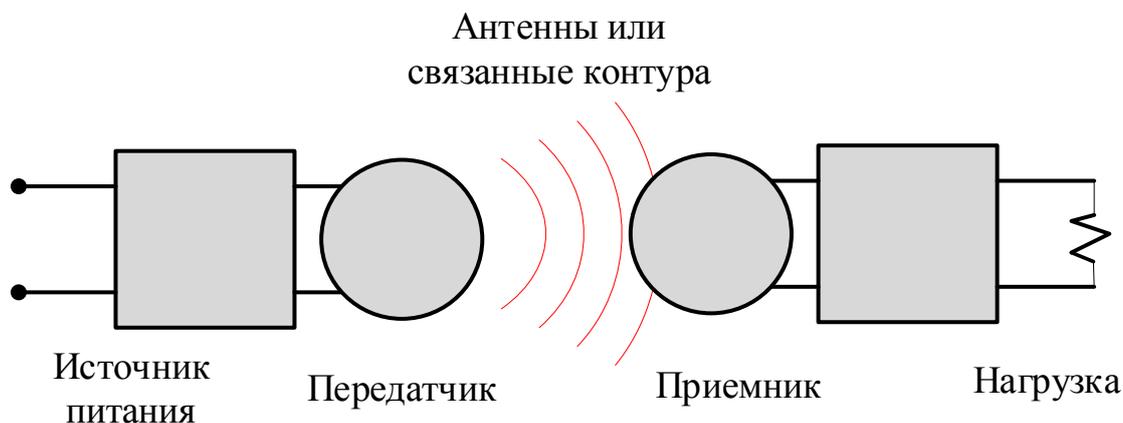


Рисунок 2 – Схема передача энергии беспроводным способом

Рассмотрим, на каких физических процессах основаны основные методы беспроводной передачи электроэнергии.

1.2.1. Метод электромагнитной индукции

В этом случае используется электромагнитное поле. Благодаря явлению взаимной индукции, на вторичной обмотке устройства создается наведенный ток с первичной обмотки. Для эффективного взаимодействия необходимо близкое расположение обмоток, так как в противном случае большая часть энергии поля тратится впустую. Описанное устройство представляет собой знакомый всем трансформатор. Действительно, раз обмотки не связаны физически, то электричество передается беспроводным способом (рис. 3). Применяется данный способ для зарядки мобильных устройств, медицинских имплантатов и электромобилей. Кроме того, метод нашел применение в технологиях радиочастотной идентификации (RFID).

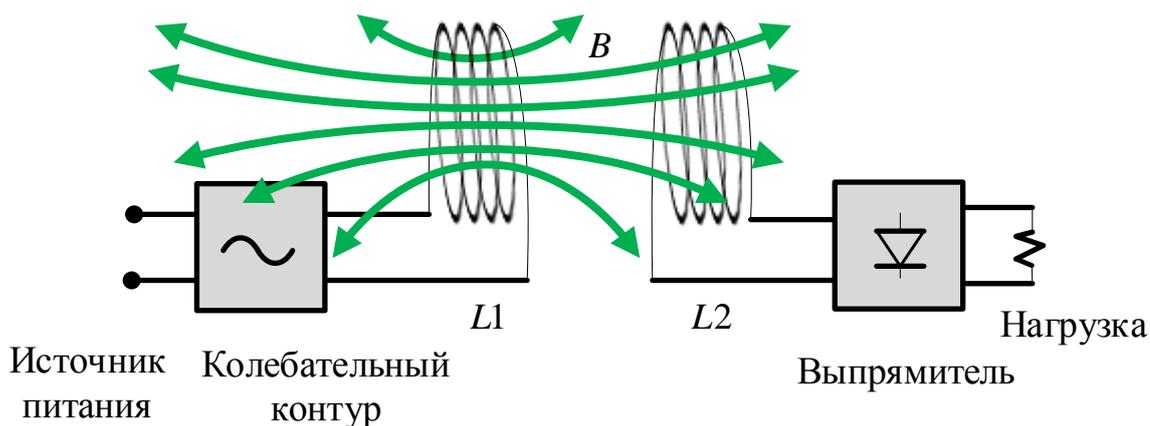


Рисунок 3 – Схема передачи энергии методом магнитной индукции

1.2.2. Метод магнитно-резонансной индукции

Данный метод отличается от вышеприведенного метода в том, что использование резонанса между двумя катушками увеличивает дальность передачи. Действительно, при магнитно-резонансной индукции передающая и принимающая катушка настроены на одинаковую частоту, поэтому амплитуда электромагнитных волн возрастает, следовательно, передача энергии происходит более эффективно, чем в методе электромагнитной индукции (рис. 4).

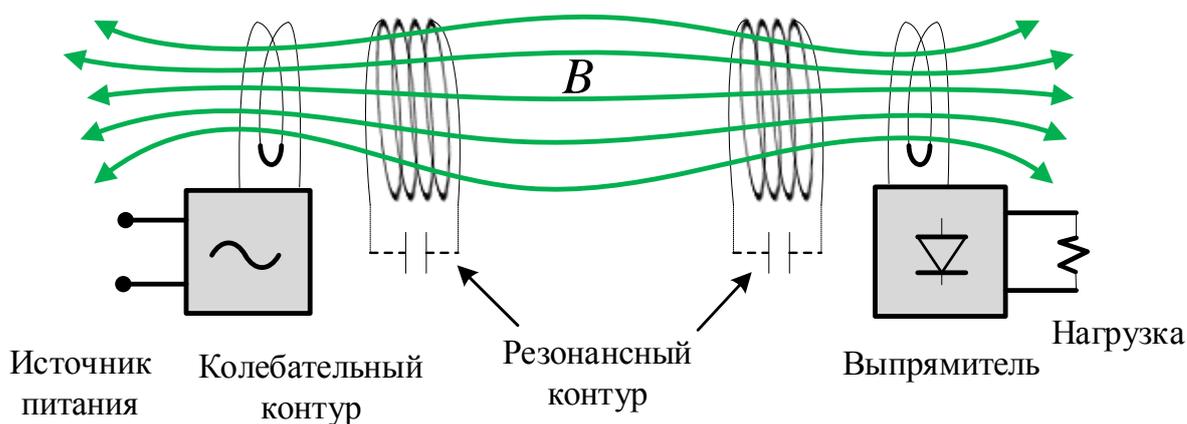


Рисунок 4 – Схема передачи энергии методом магнитно-резонансной индукции

В связи с этим, значительная величина мощности передается между двумя LC-катушками, настроенными в резонанс, при относительно невысоком коэффициенте связи между ними. Обычно, передающая и

принимающая катушка представляет собой спираль или один или несколько однослойных витков.

1.2.3. Метод электростатической индукции

Метод электростатической индукции. Представляет собой процесс передачи энергии через диэлектрик (рис. 5). Метод был впервые применен Теслой для питания беспроводных ламп по воздуху (который является диэлектриком). В будущем планируется, что устройства будут получать энергию из воздуха, посредством передающего терминала. По сути, этот процесс схож с разрядом конденсатора.

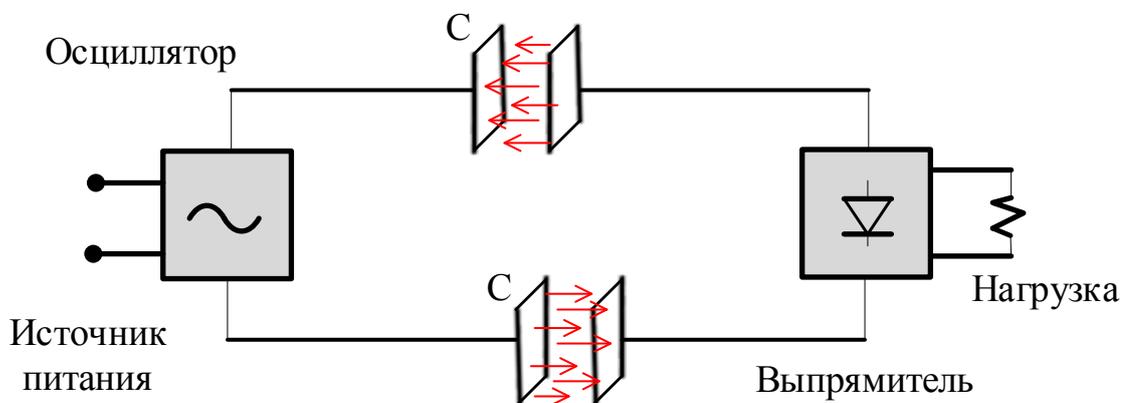


Рисунок 5 – Схема передачи энергии методом электростатической индукции

1.2.4. Метод микроволнового излучения

Ученые рассчитали, что передавать энергию становится более эффективно, если использовать меньшие длины волн. В микроволновом диапазоне для передачи энергии используется ректенна – устройство по принципу действия обратное излучающей антенне. Ректенна позволяет преобразовывать энергии с КПД 90-95%. Данный способ планируется применять для передачи энергии космическим и орбитальным аппаратам.

Уходя в более высокий диапазон частот, ученые нашли еще один способ беспроводной передачи энергии – лазерный. Он заключается в передаче энергии посредством светового луча и последующего его

преобразования в электричество в фотодетекторе. К преимуществам относится высокая фокусировка луча, а к недостаткам – низкий КПД.

КОСМИЧЕСКАЯ СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

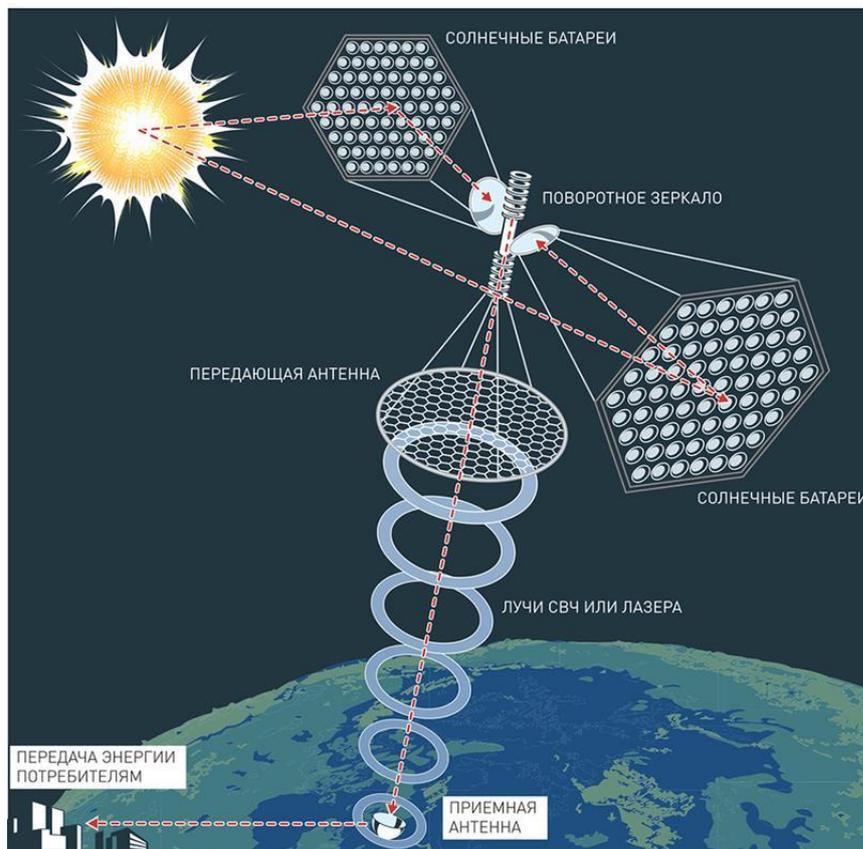


Рисунок 6 – Схема передачи энергии с помощью электромагнитных излучений

1.3. Сферы применения беспроводной передачи энергии

Одной из сфер применения технологии беспроводной передачи энергии является беспроводные зарядные устройства, а именно беспроводная зарядка смартфонов, планшетных компьютеров, цифровых фото- и видеокамер и прочих гаджетов. Многочисленные адаптеры и зарядные устройства разных производителей, отличающиеся электрическими характеристиками и конструкциями, становятся существенной проблемой для владельцев такого рода оборудования, поэтому переход к универсальным зарядным устройствам является весьма важным вопросом потребителей. Зачастую пользователь сталкивается с проблемой замены старого зарядного устройства при покупке нового телефона или другого высокотехнологичного гаджета,

также весьма печально обстоят дела с распутыванием «паутины» проводов в поиске нужного зарядного устройства, поэтому широкое внедрение универсального зарядного устройства освободит пользователей от подобного рода проблем.

Особо стоит отметить, что технологии беспроводной передачи энергии могут успешно применяться не только в беспроводной зарядке интеллектуальных гаджетов, но и в промышленной отрасли: заряд аккумуляторов транспортных средств, имплантируемых устройств в медицине, в военной технике, в качестве источника энергии для светодиодного освещения в помещении и многое др.

В медицине использование разнообразных имплантируемых устройств в сердце человека требует со временем их подзарядки. Такими устройствами являются кардиостимуляторы, инфузионные насосы и другие, поэтому широкое внедрение беспроводных систем зарядки для замены элементов питания в таких устройствах, позволяет отказаться от хирургического вмешательства (рис. 7).

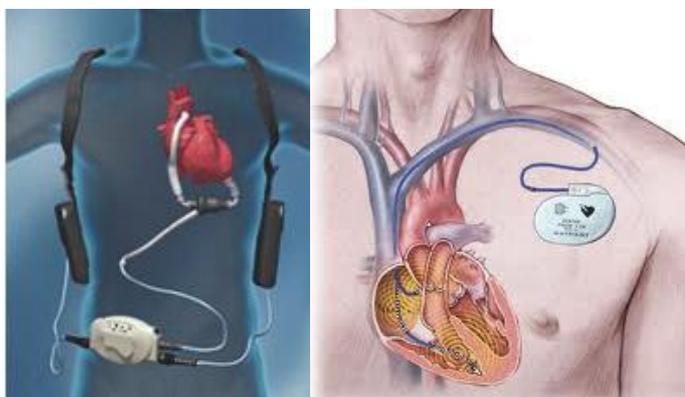


Рисунок 7 – Использование беспроводной передачи энергии в медицине

Еще одним ярким примером использования беспроводной зарядки является зарядка аккумуляторов автомобилей. В настоящее время такие системы уже обеспечивают передачу мощности на транспортные средства величиной 3,3 кВт с высокой эффективностью на расстоянии 10-20 см. В таком случае, для осуществления зарядки индуцированным способом,

автомобиль достаточно расположить над передающим устройством, в то время как процесс зарядки начнется автоматически (рис. 8).



Рисунок 8 – Использование беспроводной передачи энергии в зарядке аккумуляторов автомобилей

В военной отрасли технологию беспроводной передачи электроэнергии используют в технике военного назначения для повышения надежности, безопасности электронных устройств и эргономичности. К таким технологиям можно отнести военные каски, в которых электронные устройства питаются от батарей, расположенных в специальном жилете солдата, что исключает необходимость соединения проводов или одноразовых батарей, а также радиоуправляемые машины-саперы и различного рода беспилотники (рис. 9).



Рисунок 9 – Использование беспроводной передачи энергии в военной отрасли

1.4. Принцип действия беспроводной передачи электроэнергии на основе явления электромагнитной индукции

Каждый из вышеперечисленных методов передачи электроэнергии имеет свои особенности, однако использование технологий беспроводной передачи электроэнергии посредством явления электромагнитной индукции получили наибольшее распространение в электротехнике.

В зависимости от того, где расположен источник излучения, область распространения электромагнитного поля можно разделить на две основные зоны: ближняя и дальняя зоны. Ближняя зона – зона индукции, ограничивается расстоянием равным $\lambda / 2\pi$, где λ – длина волны (рис. 10). Также на границе раздела ближней и дальней зон существует переходная промежуточная зона, в которой зона индукции, т.е. ближняя зона переходит в зону излучения.

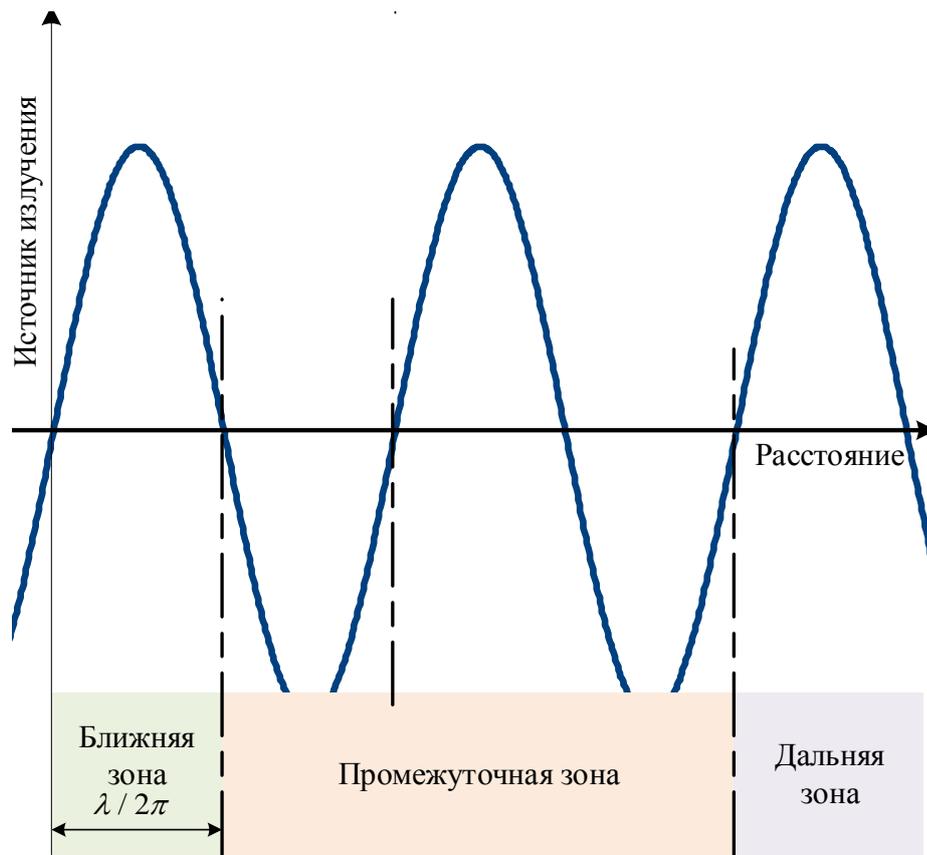


Рисунок 10 – Распространение электромагнитной волны. Ближняя и дальняя зоны

Протяженность ближней зоны рассчитывается по выражению согласно [1]:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.1)$$

где c – скорость света, равная $3 \cdot 10^8$ м/с;

f – частота распространения электромагнитной волны, Гц.

Например, при частотах электромагнитной волны 1, 10 и 100 МГц протяженность ближней зоны составит примерно 300, 30 и 3 м соответственно.

Рассмотрим более подробно явление электромагнитной индукции, которое используется в системах беспроводной передачи энергии от источника питания к приемнику на примере индуктивно связанных элементов цепи.

1.4.1. Индуктивно связанные элементы цепи

При наличии в непосредственной близости двух катушек индуктивности в последней катушке, благодаря индукции, будет появляться электродвижущая сила (ЭДС) взаимной индукции, определяемая по закону Фарадея – Максвелла. Таким образом, между катушками установится индуктивная связь (рис. 11) [1].

Система состоит из первичной цепи L_1 (источник питания) и вторичной цепи L_2 (приемная катушка). При протекании переменного тока в первичной цепи создается магнитное поле, которое в свою очередь индуцирует напряжение в приемной цепи, которое используют в качестве источника энергии для зарядки аккумуляторов или для питания устройств. По мере удаления приемной катушки от источника питания основная часть магнитного поля рассеивается и не пронизывается линиями магнитного поля приемную катушку. Таким образом, даже при весьма малых расстояниях такая связь между катушками становится неэффективной.

Степень индуктивной связи двух элементов цепи оценивается коэффициентом индуктивной связи k , который описывается следующим отношением:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (1.2)$$

где M – взаимная индуктивность элементов цепи;

L_1 , L_2 – индуктивность первого и второго элементов цепи соответственно.

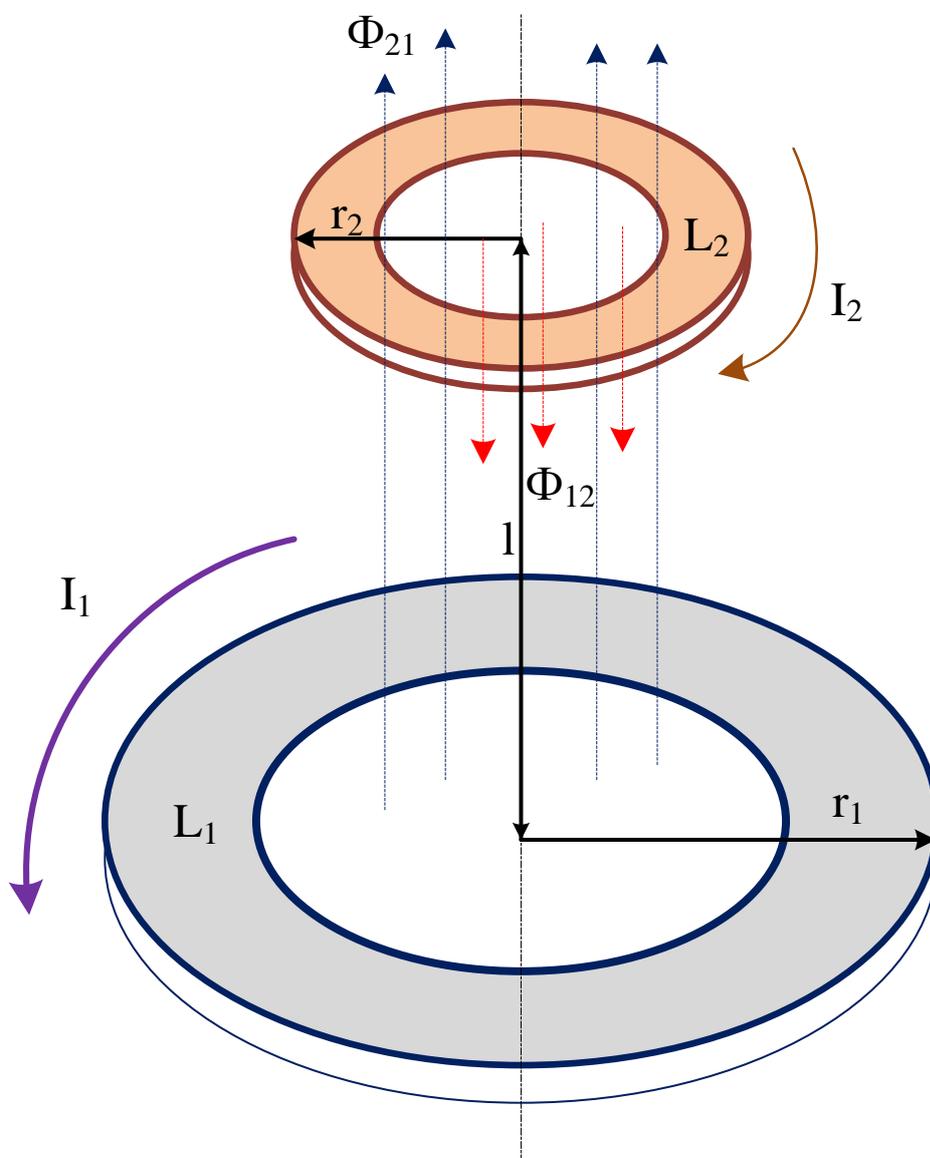


Рисунок 11 – Система двух индуктивно связанных катушек

Коэффициент связи зависит от многих факторов, таких как: расстояние между катушками l , соотношения диаметров первичной и вторичной катушек, расположение вторичной катушки относительно первичной, формы катушек (единичное кольцо или сложная геометрия катушки) и т.д.

В практических целях витки двух катушек, так же как и различные витки одной и той же катушки, пронизываются неодинаковыми магнитными потоками, и поэтому коэффициент индуктивности связи $k < 1$.

Изменения индуктивной связи между двумя катушками можно достигнуть перемещением одной катушки относительно другой, т.е. значение k может изменяться от 0 (отсутствие связи между катушками) до 1 (жесткая связь катушек).

Для увеличения эффективности передачи энергии между индуктивно-связанными контурами используют резонансные контуры с индуктивной связью. Такие системы применяются в разнообразных радиотехнических устройствах на протяжении последних десятков лет. Рассмотрим явление резонанса в индуктивно связанных контурах.

1.4.2. Резонанс в индуктивно связанных контурах

В устройствах электроники и радиотехники наряду с одиночными последовательными и параллельными контурами применяются и связанные контуры. Контур может иметь индуктивную связь (трансформаторную или автотрансформаторную) или емкостную различного вида. Рассмотрим резонансные явления для случая двух одинаковых контуров, имеющих индуктивную (трансформаторную) связь (рис. 12).

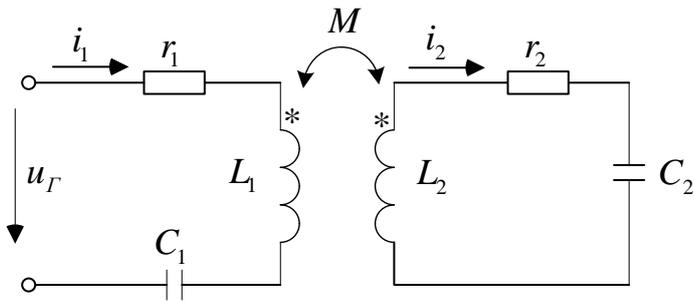


Рисунок 12 – Упрощенная эквивалентная схема индуктивно связанных катушек

В электрической схеме индуктивно связанных контуров (рис. 12) представлены следующие параметры:

- i_1, i_2 – ток протекающей по обмотке, А;
- r_1, r_2 – активное сопротивление проводника, Ом;
- L_1, L_2 – индуктивность обмотки, Гн;
- C_1, C_2 – емкость обмотки, Ф;
- M – взаимная индуктивность контура, Гн;
- u_T – напряжение на источнике, В.

где индекс параметров электрической схемы 1 и 2 обозначает первичную и вторичную обмотку.

Режим цепи определяется двумя уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} (r + jx) \cdot \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2 &= \underline{U}_1; \\ (r + jx) \cdot \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

где $x = \omega L - 1 / \omega C$.

При частоте $\omega_1 = \omega_2 = 1 / \sqrt{L \cdot C} = \omega_0$ у каждого контура $x = 0$ (каждый настроен в резонанс) – так называемый «полный резонанс».

$$\left. \begin{aligned} r \cdot \underline{I}_1 - j\omega M \cdot \underline{I}_2 &= \underline{U}_1 \\ r \cdot \underline{I}_2 - j\omega M \cdot \underline{I}_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\underline{I}_2 = j\omega M \cdot \underline{I}_1 / r$$

$$r \cdot \underline{I}_1 + \frac{\omega^2 M^2}{r} \cdot \underline{I}_1 = \underline{U}_1$$

Из (1.3) следует, что ток $\underline{I}_{1p} = r \cdot \underline{U}_1 / (r^2 + \omega_0^2 M^2)$, т.е. совпадает по фазе с напряжением \underline{U}_1 , и цепь настроена в резонанс. Ток во вторичной обмотке

$$\text{находится как, } \underline{I}_{2p} = j\omega_0 M \cdot \underline{I}_{1p} / r = \frac{j\omega_0 M}{r} \cdot \frac{\underline{U}_1 \cdot r}{(r^2 + \omega_0^2 M^2)} = \frac{j\omega_0 M \cdot \underline{U}_1}{(r^2 + \omega_0^2 M^2)}.$$

При любой другой частоте из (1.3) ток во вторичной обмотке равен:

$$\underline{I}_2 = j\omega M \cdot \underline{U}_1 / [(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]$$

В относительных единицах:

$$\begin{aligned} \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_{2p}} &= \frac{j\omega M \cdot \underline{U}_1}{[(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]} \cdot \frac{(r^2 + \omega_0^2 M^2)}{j\omega_0 M \cdot \underline{U}_1} = \\ &= \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{r^2 + \omega_0^2 M^2}{[(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]} = \omega_* \cdot \frac{r^2 + \omega_0^2 M^2}{[(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]} \end{aligned} \quad (*)$$

Тогда, поделив числитель и знаменатель на r^2 , получим:

$$\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_{2p}} = \omega_* \cdot \frac{1 + \omega_0^2 M^2 / r^2}{(1 + jx/r)^2 + \omega^2 M^2 / r^2}$$

$$\text{Так как } \frac{\omega_0 M}{r} = \frac{\omega_0 L}{r} \cdot \frac{M}{L} = Q \cdot k$$

где $\omega_* = \omega / \omega_0$ – относительная частота;

Q – добротность каждого из контуров;

$$k = M / \sqrt{L_1 \cdot L_2} = M / L – \text{коэффициент связи.}$$

Следовательно, подставляя полученные многочлены в выражение (*) получается следующее выражение:

$$\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_{2p}} = \omega_* \cdot \frac{1 + (k \cdot Q)^2}{(1 + j\xi)^2 + (k \cdot Q)^2} \quad (1.4)$$

Где ξ – обобщенная расстройка.

$$\xi = \frac{x}{r} = \frac{\omega L - 1 / \omega C}{r} = \frac{\omega_* \omega_0 L - 1 / \omega_* \omega_0 C}{r} = Q \cdot \left(\omega_* - \frac{1}{\omega_*} \right)$$

В выражении (1.4) принято, что при построении резонансной кривой контура с достаточно большой добротностью можно принять множитель $\omega_* = \omega / \omega_0 = 1$ и при вычислении добротности Q считать $\omega L \approx \omega_0 L$, тогда резонансная кривая описывается следующим выражением:

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \omega_* \cdot \frac{1 + (k \cdot Q)^2}{\sqrt{[1 - \xi^2 + (k \cdot Q)^2]^2 + 4 \cdot \xi^2}}$$

Если $k \cdot Q \ll 1$ – слабая связь контуров, то

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \xi^2)^2 + 4 \cdot \xi^2}} = \frac{1}{1 + \xi^2}$$

В этом случае, резонансная кривая имеет один максимум при $\xi = 0$, т.е. при $\omega = \omega_0$. Ток I_2 меньше I_{2p} в $\sqrt{2}$ раз (границы полосы пропускания) при $\xi = \pm 0,64$, а у последовательного контура, согласно [1], $I / I_p = 1 / 1 + \xi^2$ и на границах полосы пропускания равны $\xi = \pm 1$. Следовательно, полоса пропускания связанных контуров при слабой связи меньше, чем у последовательно контура (рис. 13).

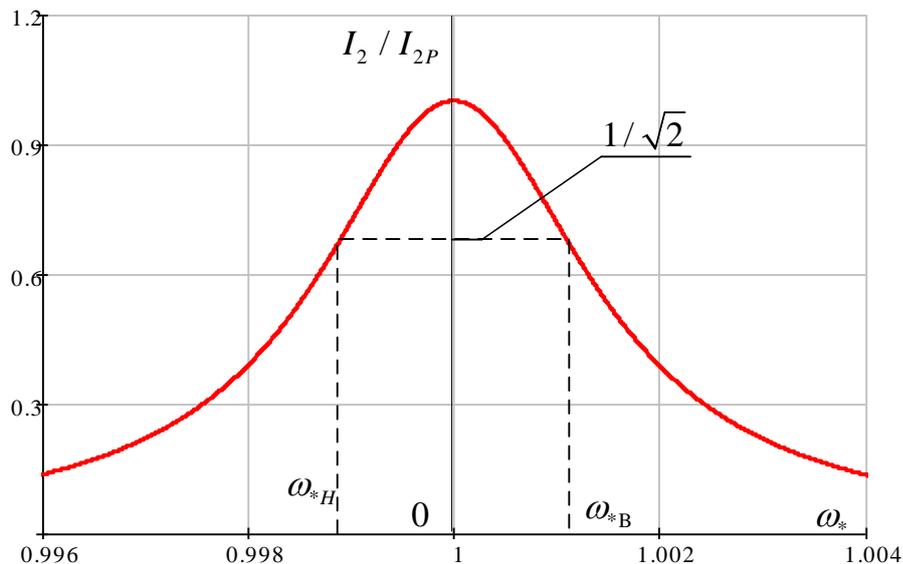


Рисунок 13 – Частотная характеристика при слабой связи контуров

При $k \cdot Q = 1$ – критической связи, то

$$\frac{I_2}{I_{2P}} = \frac{1+1}{\sqrt{(1-\xi^2+1)^2 + 4 \cdot \xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^4/4}}$$

В этом случае на границах полосы пропускания $\xi = \pm\sqrt{2}$, т.е. полоса пропускания больше, чем у последовательного контура (рис. 14).

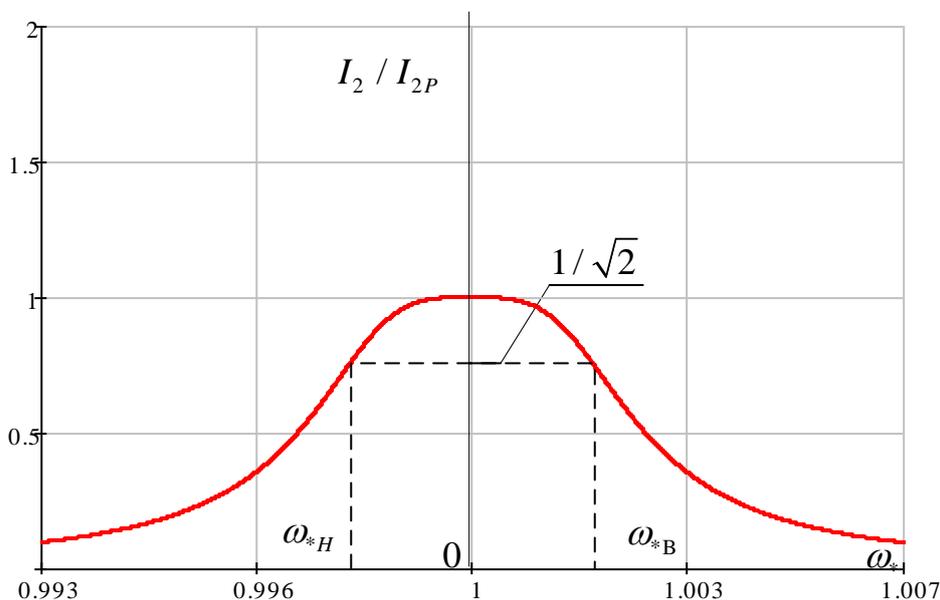


Рисунок 14 – Частотная характеристика при критической связи контуров

Если $k \cdot Q \gg 1$ – сильная связь контуров, то получается, что резонансная кривая с двумя максимумами (рис. 15). Если считать, что на границе полосы пропускания значения тока I_2 , как и у последовательного контура, в $\sqrt{2}$ раз меньше максимального, то получится полоса пропускания $\omega_{*B} - \omega_{*H}$ в 3,1 раза шире и ближе к прямоугольной, чем у последовательного контура при той же добротности контуров, что может важным достоинством цепи при построении систем с большой полосой пропускания (широкополосных) [1].

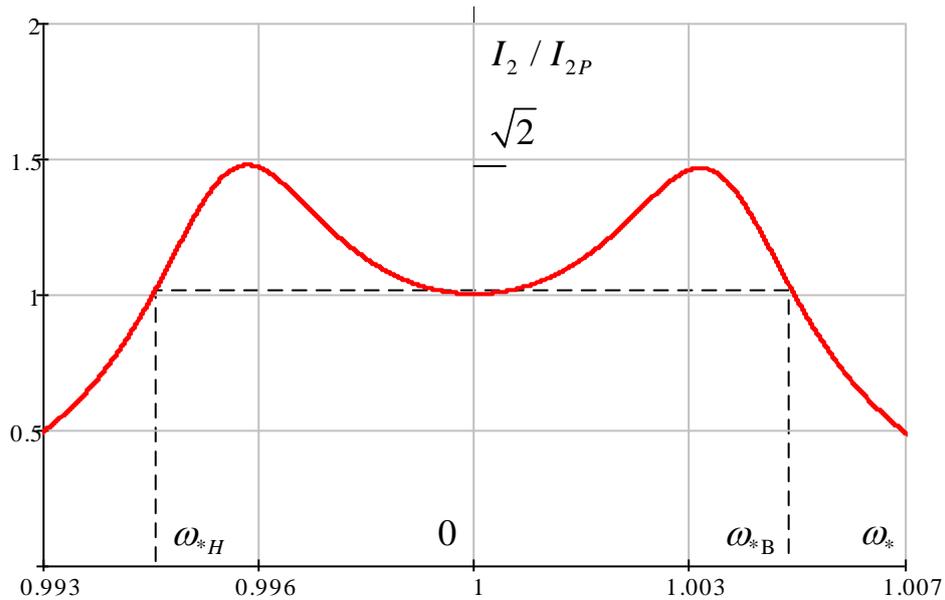


Рисунок 15 – Частотная характеристика при сильной связи контуров

Значение тока I_2 зависит от коэффициента связи контуров. Наибольшее значение можно найти обычным исследованием на максимум. Оно получается при $\omega_0 M = r$ и $I_{2p\max} = U_1 / 2r$.

Обобщая вышеприведенные графики частотных характеристик, следует указать, что рассматриваемая цепь обладает «избирательным свойством». Для оценки избирательного свойства цепи применяют понятие ширины резонансной кривой или полоса пропускания контура ($\omega_{*B} - \omega_{*H}$), которую, как правило, определяют разностью верхней и нижней частот, при отношении токов $I / I_{2p} = 1 / \sqrt{2}$.

Также на форму резонансной кривой влияет такой параметр цепи, как обобщенная расстройка контура относительно резонансной частоты ξ , которая полностью зависит от добротности контура Q .

1.5. Выводы

1. В настоящее время использование технологий беспроводной передачи энергии находит широкое применение в беспроводной зарядке батарей или устройств, которые требуют частой подзарядки.

2. Наряду со многими методами беспроводной передачи энергии, именно технологии, основанные на явлении электромагнитной индукции, получили наибольшее распространение среди потребителей.

3. Для увеличения эффективности передачи энергии посредством двух индуктивно связанных контуров используют резонансные индуктивные цепи.

4. Коэффициент индуктивной связи k , которым характеризуется система индуктивно связанных контуров, зависит от расстояния между катушками l , соотношения диаметров первичной и вторичной катушек, расположение вторичной катушки относительно первичной, формы катушек (единичное кольцо или сложная геометрия катушки) и т.д.

5. При слабой связи контуров, когда произведение коэффициента связи и добротности контура намного меньше 1 (рис. 13), четко наблюдается свойство избирательности контура, т.е. при достаточно высокой добротности контура пик резонансной кривой становится более острым, чем обуславливаются лучше «избирательные свойства» контура.

РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КАТУШЕК В COMSOL MULTIPHYSICS

Comsol Multiphysics – программное обеспечение, предназначенное для моделирования любых физических процессов и изучения различных физических явлений, их взаимосвязи с окружающей средой и между ними.

Создание моделей, которые описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, проектирование сложных устройств и систем – главная задача программного пакета Comsol Multiphysics. Все вычисления в программе реализуются на методе конечных элементов (МКЭ).

Данный метод возник в результате решения задач космической направленности советскими учеными в 1936 году и впоследствии описан такими учеными и инженерами, как Мелощ, Клаф, Мартин, Тэрнер и др. В основе метода лежат две главные идеи: разбиение исследуемого объекта на конечное число элементов – дискретизация и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций.

Исследуемая область или тело (конструкция) разбивается на множество конечных элементов, которые могут иметь различную форму и размеры (рис. 16). Результатом разбиения является сетка из границ конечных элементов.

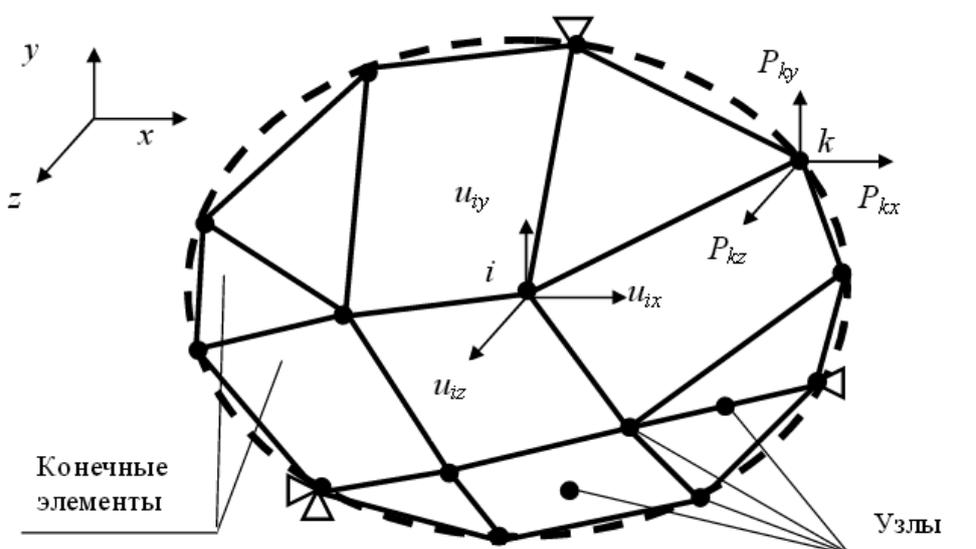


Рисунок 16 – Фрагмент конечно-элементной модели

В каждом из этих элементов произвольным способом выбирается вид аппроксимирующей функции, например полином первой степени. Вне элемента значения этой функции равны нулю, в то время как в самом элементе (в узлах) значения функций являются решением поставленной задачи и заранее неизвестны. В зависимости от количества неизвестных значений в узлах, составляется система линейных алгебраических уравнений.

2.1. Создание исходной области и геометрии объектов

Постановка задачи исследования сводится к тому, чтобы получить оптимальные параметры катушки при передаче энергии беспроводным путем с максимальной эффективностью на расстоянии, не превышающим размеры комнаты. Передающая катушка должна иметь такие размеры, чтобы она удовлетворяла условиям практичности и целесообразности ее установки.

В пункте 4.2 было отмечено, что максимальная эффективность передачи энергии происходит при условии резонанса со слабой связью между индуктивно связанными катушками.

Таким образом, требуется вычислить следующие параметры: индуктивность и активное сопротивление, зависящее от частоты, и собственную емкость катушки.

В целях упрощения расчетов возьмем катушку в форме одного кругового кольца радиусом $R=0,25$ м выполненного из медного провода кругового сечения, имеющего радиус $r=5$ мм (рис. 17).

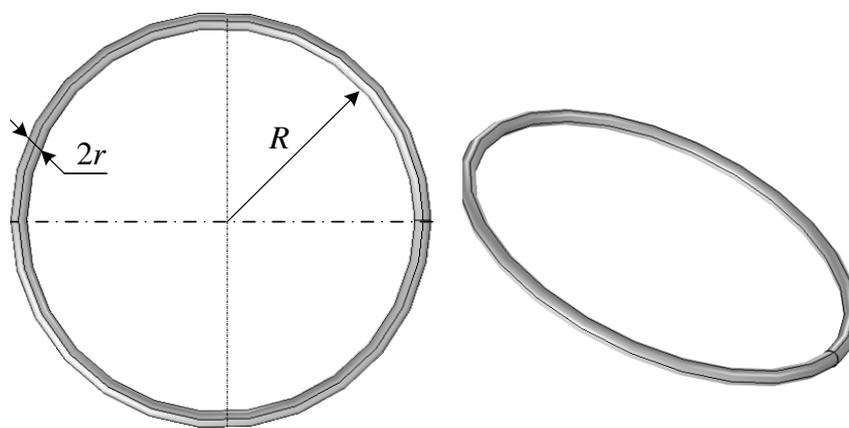


Рисунок 17 – Геометрия катушки из медного провода

Следующим этапом требуется задать область, в которой произойдет разбиение кольца на конечные элементы. Задаем сферу произвольного радиуса, внутри которой находится исследуемое кольцо (рис. 18).

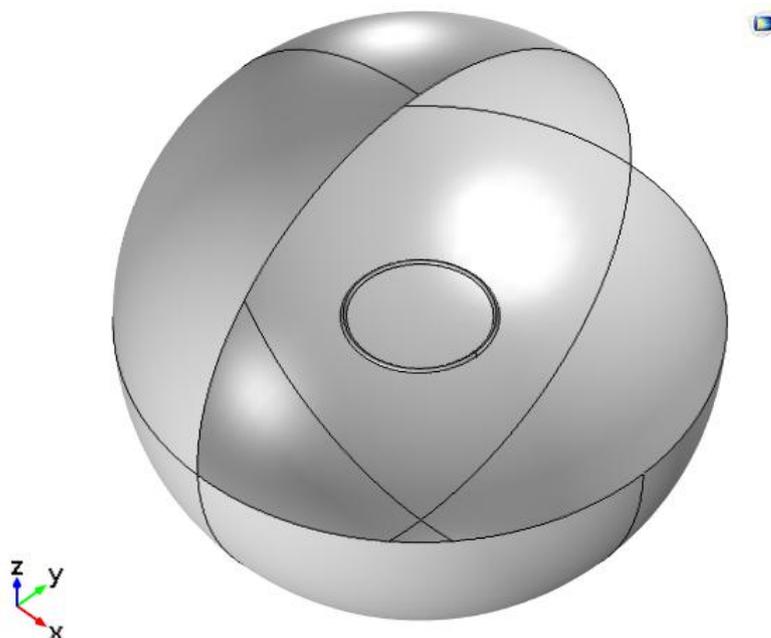


Рисунок 18 – Геометрическое построение модели

Получив исследуемую область и объект, требуется создать сетку, которая используется для дискретизации модели при расчетах методом конечных элементов. Модель разбивается на малые геометрические части – в данном случае разбивка происходит на тетраэдры (рис. 19).

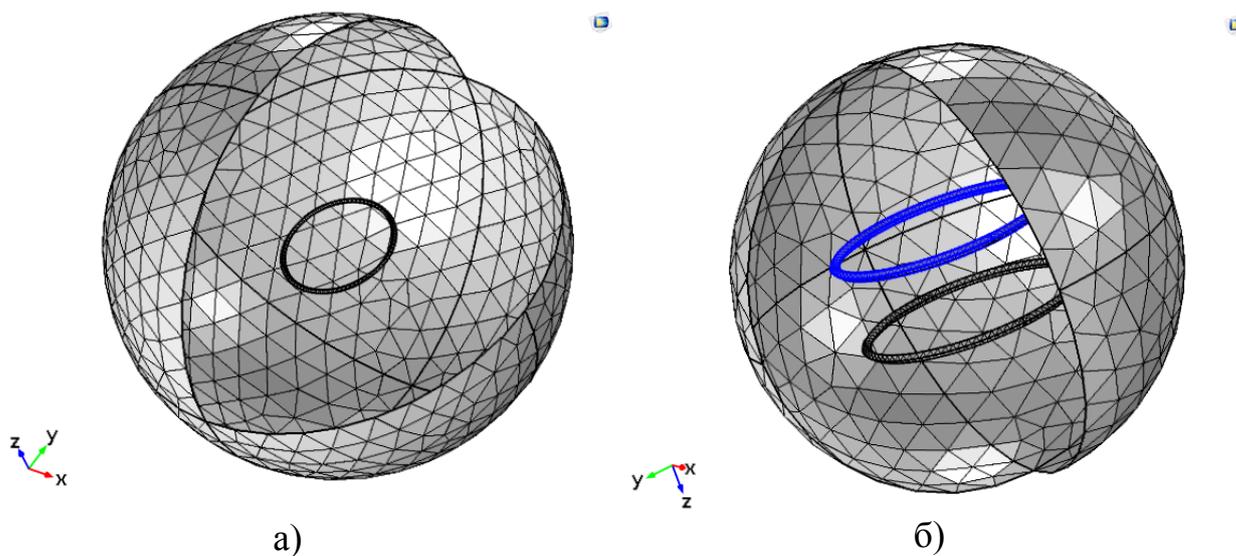


Рисунок 19 – Задание сетки модели: а – в системе одного кольца; б – система, состоящая из двух колец

2.2. Описание математической модели объекта исследования

Для проведения расчета требуется учесть, что подаваемое напряжение на катушку от источника питания происходит в высокочастотном диапазоне, следовательно, при подаче такого напряжения на передающую катушку, будут протекать высокочастотные токи таким образом, что плотность распределения тока по сечению будет концентрироваться вблизи поверхности катушки. Такое явление называется скин-эффектом и характеризует зависимость сопротивления и индуктивности от частоты.

Сделаем расчет плотности распределения тока в поперечном сечении проводника с помощью системы уравнений Максвелла, которая позволяет получить уравнение для векторного магнитного потенциала \mathbf{A} .

Уравнение для постоянного тока, связывающее магнитную индукцию \mathbf{B} и векторный магнитный потенциал \mathbf{A} , описывается выражением:

$$\mathbf{B} = \nabla \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{pmatrix} = \mathbf{i} \left(\frac{\partial}{\partial y} A_z - \frac{\partial}{\partial z} A_y \right) + \mathbf{j} \left(\frac{\partial}{\partial z} A_x - \frac{\partial}{\partial x} A_z \right) + \mathbf{k} \left(\frac{\partial}{\partial x} A_y - \frac{\partial}{\partial y} A_x \right) \quad (2.1)$$

Уравнение для постоянного тока, связывающее напряженность магнитного поля \mathbf{H} и вектор плотности тока \mathbf{J} , описывается выражением:

$$\nabla \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{pmatrix} = \mathbf{i} \left(\frac{\partial}{\partial y} H_z - \frac{\partial}{\partial z} H_y \right) + \mathbf{j} \left(\frac{\partial}{\partial z} H_x - \frac{\partial}{\partial x} H_z \right) + \mathbf{k} \left(\frac{\partial}{\partial x} H_y - \frac{\partial}{\partial y} H_x \right) = \mathbf{J} \quad (2.2)$$

Сочетая выражения (2.1) и (2.2) получаем уравнение Пуассона для векторного потенциала \mathbf{A} через плотность тока \mathbf{J} :

$$\Delta \mathbf{A} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbf{A} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \mathbf{A} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (2.3)$$

Для переменного тока, решая уравнение Гельмгольца относительно выражения (2.1) получается следующее выражение:

$$(j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon) \mathbf{A} + \nabla \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (2.3)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

σ – удельная электрическая проводимость проводника;

ε – диэлектрическая проницаемость вещества;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме.

Преобразуем выражение (2.3) в компактную форму записи, связывающее плотность тока \mathbf{J} и векторный магнитный потенциал \mathbf{A} :

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon)\mathbf{A} + \mu\Delta\mathbf{A} = \mathbf{J}, \quad (2.4)$$

где μ – магнитная проницаемость.

При работе с выражением (2.4) можно использовать следующую компактную форму уравнения:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu^{-1}\nabla \times \mathbf{A}) = \frac{\sigma V}{2\pi r}, \quad (2.5)$$

где V – напряжение, подаваемое на катушку.

Условие для задания граничного значения вектора магнитного потенциала на внешней границе области модели описывается:

$$\mathbf{A}|_{\Gamma_{air}}, \quad (2.6)$$

После определения распределения величины магнитного потенциала необходимо рассчитать плотность тока и ток в витке провода по следующим выражениям []:

$$\mathbf{J} = \nabla \times (\mu^{-1}\nabla \times \mathbf{A}); \quad (2.7)$$

$$I = \pi \int_0^R \mathbf{J} r^2 dr, \quad (2.8)$$

Магнитная энергия вычисляется согласно выражению []:

$$W = 2\pi \oint \mathbf{A} r dr \quad (2.9)$$

Из выражения (2.8) при известном токе (2.7) можно определить индуктивность с помощью соотношения []:

$$L = \frac{2W}{|I|^2} \quad (2.10)$$

Сопротивление проводника при известном напряжении и токе определяется с помощью следующего выражения:

$$R = \operatorname{Re}\left(\frac{V}{I}\right) \quad (2.11)$$

Чтобы провести расчет представленных выше уравнений, используем программно-математический пакет Comsol Multiphysics, как и выше было отмечено, работающего по принципу метода конечных элементов. Результаты расчетов представлены на рис. 20-23.

Таким образом, зная распределение магнитного поля в катушке, можно вычислить индуктивность и активное сопротивление в зависимости от подаваемой частоты источника питания.

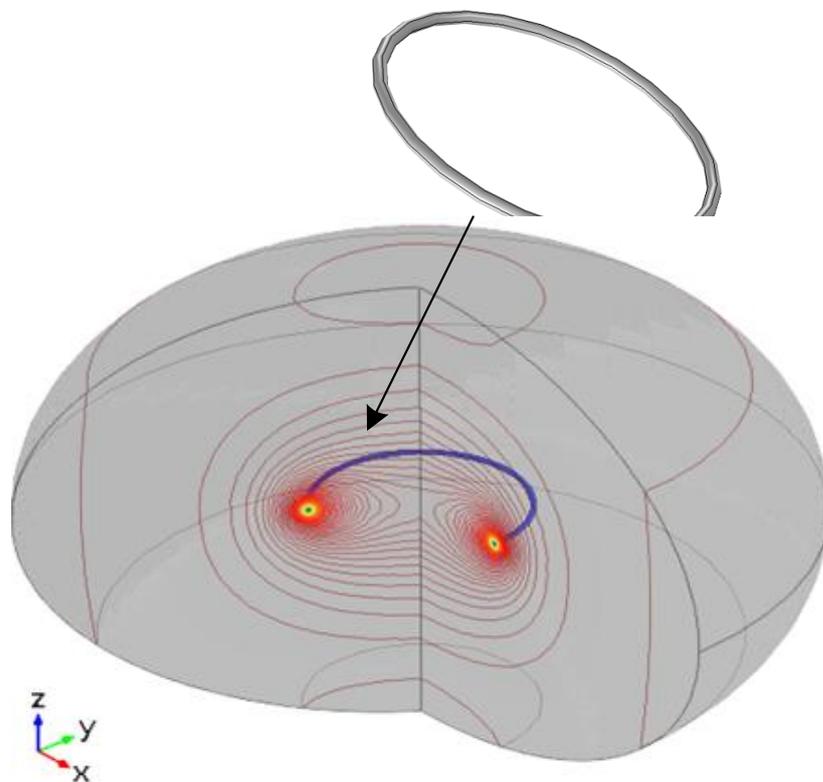


Рисунок 20 – Распределение вектора магнитного потенциала \mathbf{A} системы одной катушки

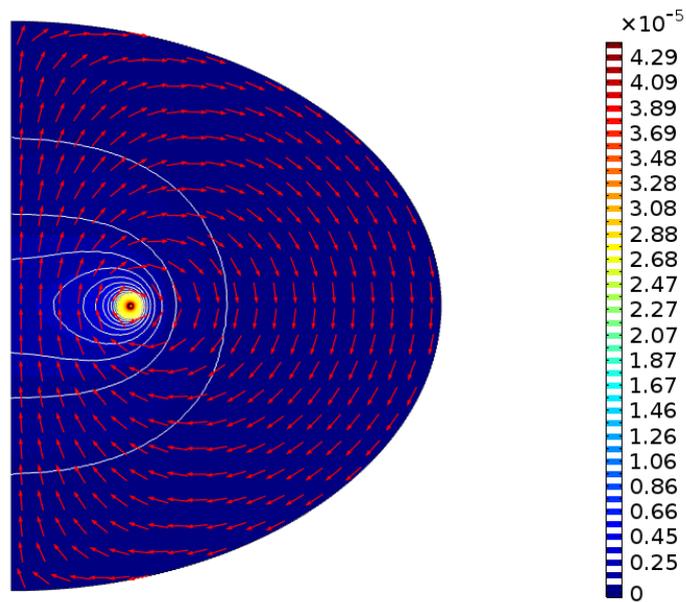


Рисунок 21 – Распределение силовых линий магнитного потенциала A_Φ

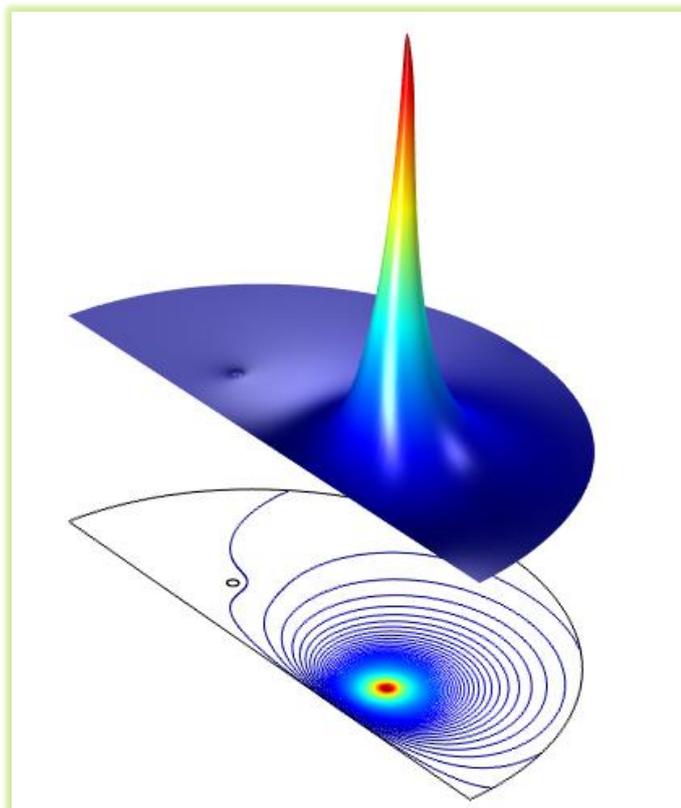


Рисунок 22 – Поле распределения вектора магнитного потенциала \mathbf{A} по поверхности катушки

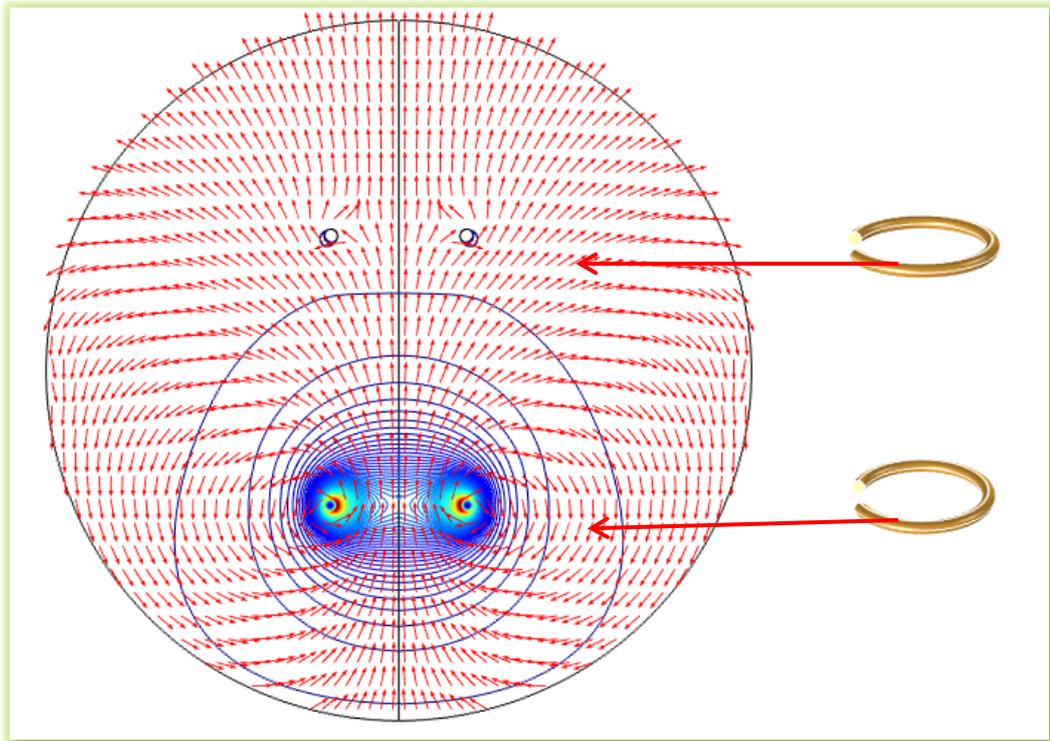


Рисунок 23 – Распределение поля магнитного потока в виде нормированных векторов, указывающих направление и интенсивность поля в виде изолиний

Вследствие скин-эффекта большая часть значения тока протекает в поверхностном слое катушки, таким образом, значительная часть поперечного сечения катушки становится неиспользуемой. Результаты моделирования распределения плотности тока \mathbf{J} [А/м²] и энергии в поперечном сечении катушки $r=5$ см и $R=0,25$ м приведены на рис. 24-26.

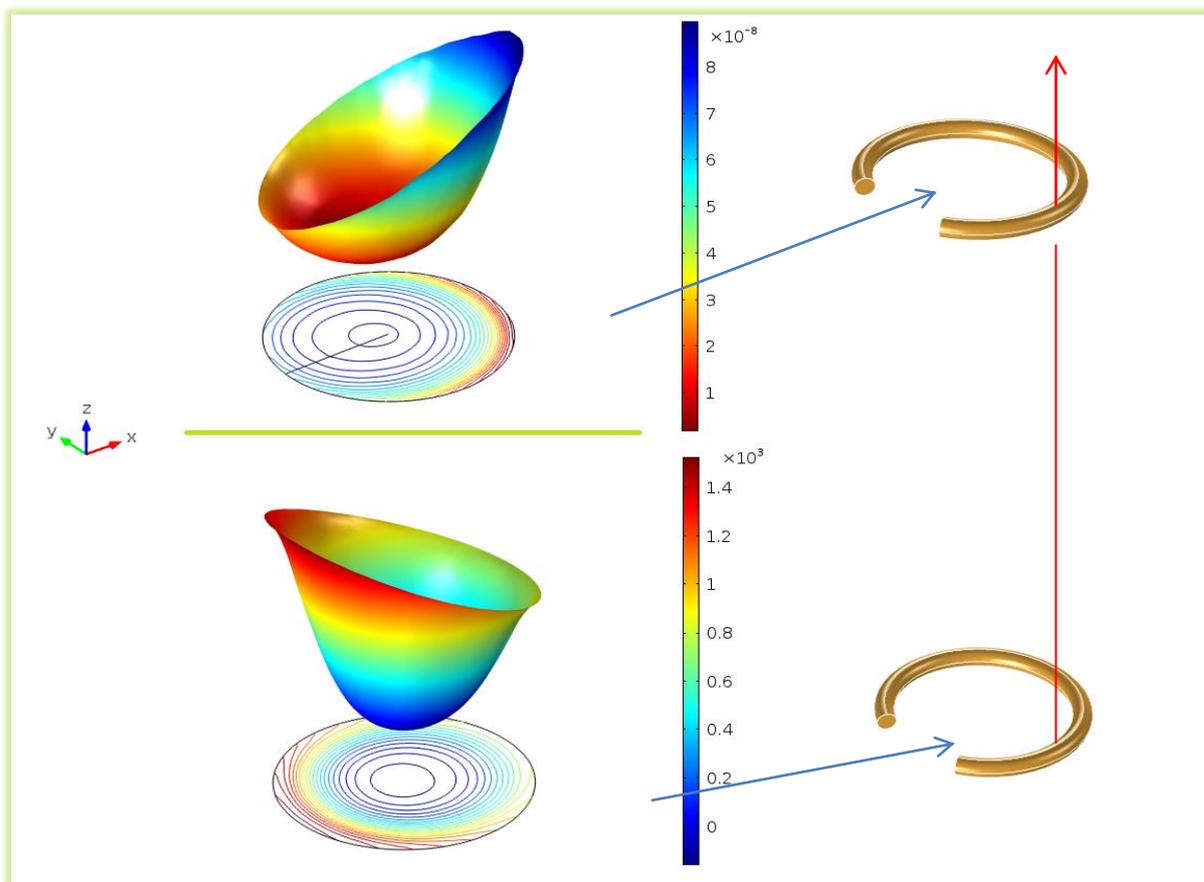


Рисунок 24 – Распределение плотности тока и энергии в поперечном сечении проводника при частоте $f=100$ Гц

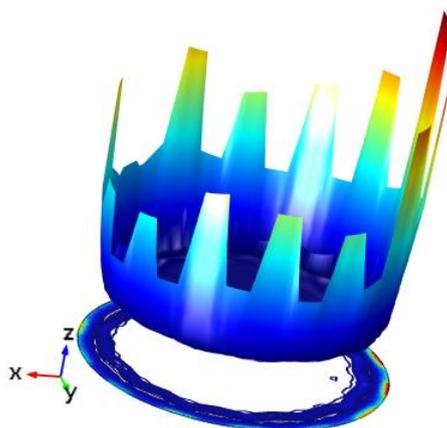


Рисунок 25 – Распределение плотности энергии в поперечном сечении проводника при частоте $f=1000$ Гц

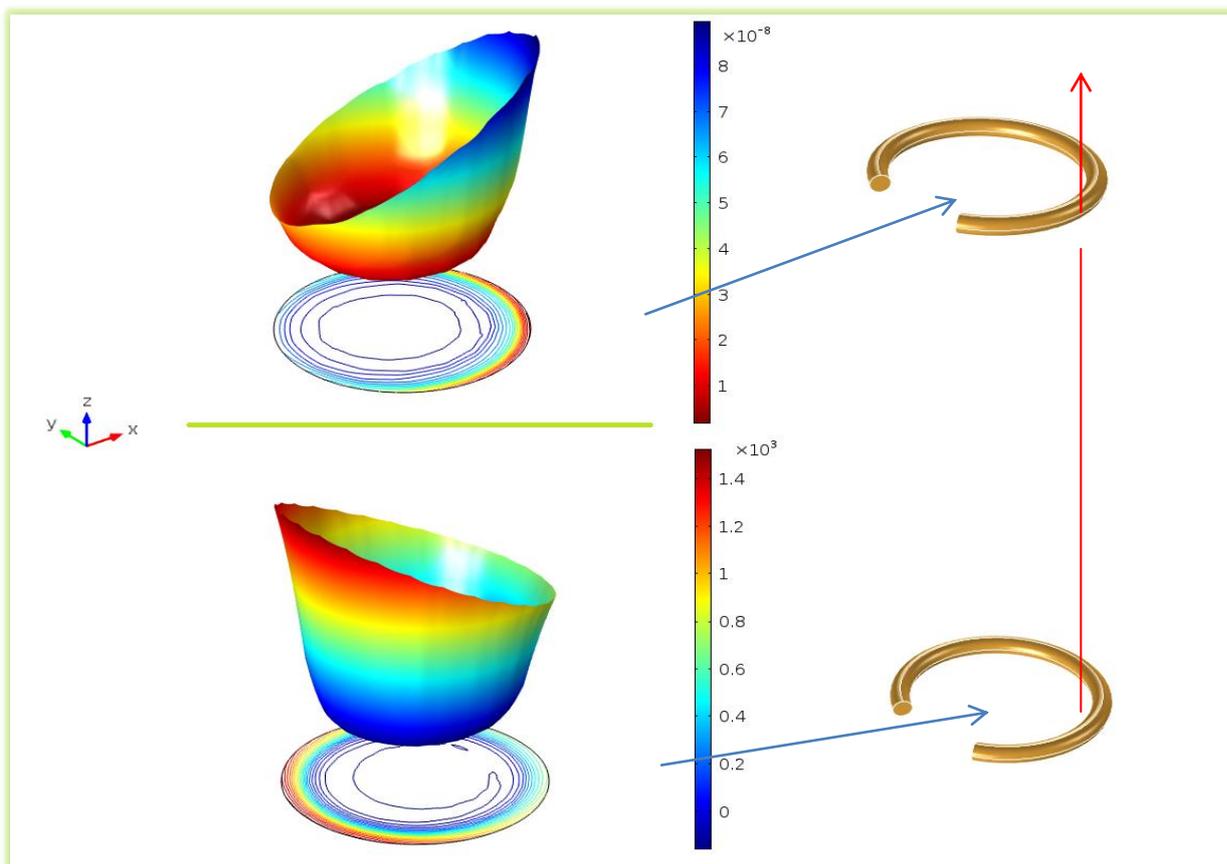


Рисунок 26 – Распределение плотности тока и энергии в поперечном сечении проводника при частоте $f=500$ Гц

2.3. Расчет индуктивности и активного сопротивления катушки в Comsol Multiphysics

На основании вышеприведенных результатов моделирования магнитного поля построим частотные зависимости индуктивности и активного сопротивления катушки. Результаты расчета представлены на рис. 27-28.

Как видно на рис. 27 индуктивность катушки в области высоких частот резко падает и устанавливается на постоянной величине, т.е. L остается без изменений в области высоких частот. Это происходит вследствие насыщения материала исследуемой катушки в области высоких частот. Полученный результат индуктивности в области высоких частот равен $L=1,238$ мкГн.

Для оценки полученных результатов, произведем расчет индуктивности согласно [] для кругового кольца сечения.

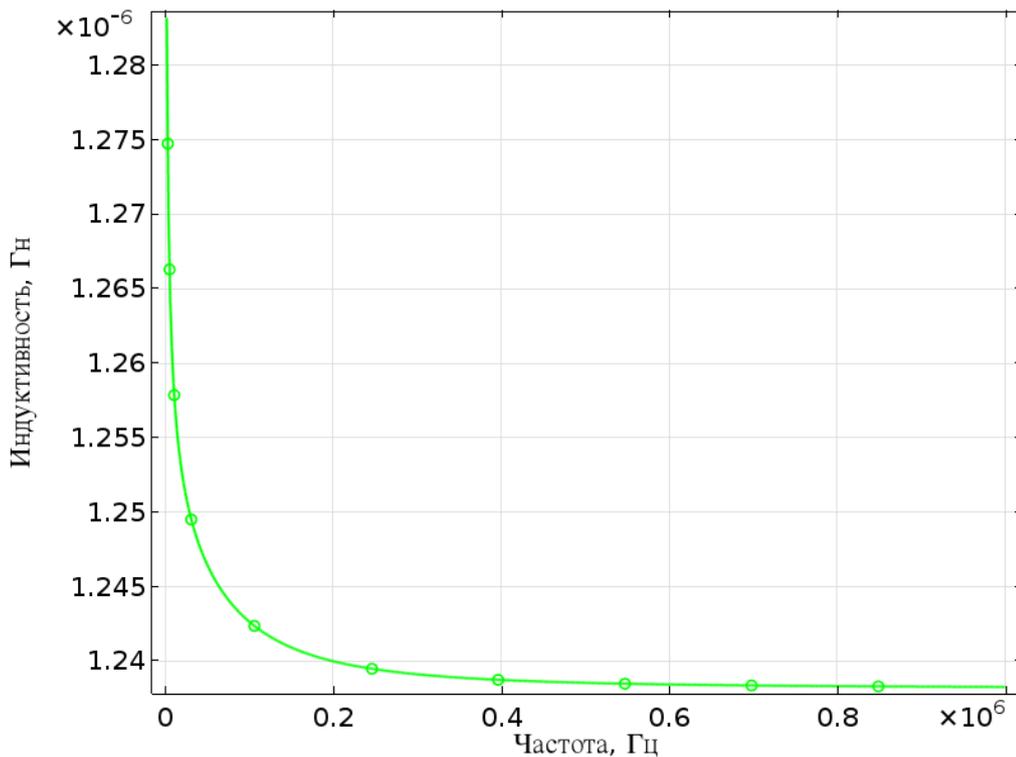


Рисунок 27 – Расчет индуктивности катушки в области высоких частот
 Согласно [], индуктивность кольца в области высоких частот при $R \gg r$ вычисляется по формуле:

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 2 \right) \quad (2.12)$$

Тогда значение индуктивности в области высоких частот равно:

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 2 \right) = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,25 \cdot \left(\ln \frac{8 \cdot 0,25}{5 \cdot 10^{-3}} - 2 \right) = 1,254 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

Сравним значение индуктивности, рассчитанной аналитически с полученным значением в Comsol Multiphysics:

$$L_{\text{эсп.}} = 1,254 \text{ мкГн.}$$

$$L_{\text{анал.}} = 1,238 \text{ мкГн.}$$

Относительная погрешность в расчетах значения индуктивности составляет:

$$\frac{L_1 - L_2}{L_2} \cdot 100\% = \frac{1,254 \cdot 10^{-6} - 1,238 \cdot 10^{-6}}{1,238 \cdot 10^{-6}} \cdot 100 = 1,27\%$$

На основании рассчитанной индуктивности делаем вывод, что расчеты проведены верно с минимальной погрешностью. На рис. 26 представлена зависимость активного сопротивления катушки от частоты.

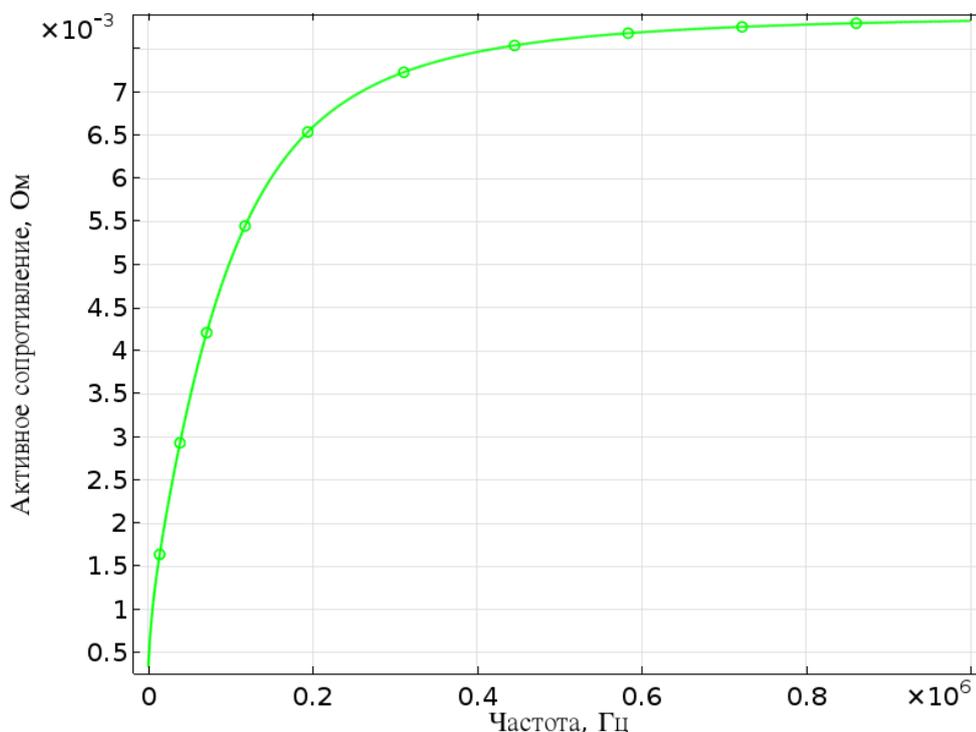


Рисунок 28 – Расчет активного сопротивления катушки в области высоких частот

2.4. Расчет собственной емкости катушки

Собственная емкость проводника форме кругового кольца рассчитывается согласно выражению []:

$$C_0 = 4\pi^2 \varepsilon R \cdot \left(\ln \left(\frac{8R}{r} \right) \right)^{-1}, \quad (2.13)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость воздуха.

Определим емкость расположенной в воздухе катушки в форме кругового кольца радиусом $R=0,25$ м и радиусом поперечного сечения $r=0,005$ м, используя формулу (2.13):

$$C_0 = 4\pi^2 \varepsilon R \cdot \left(\ln \left(\frac{8R}{r} \right) \right)^{-1} = 4 \cdot 3,14^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,25 \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot 0,25}{0,005} \right) \right)^{-1} = 14,58 \text{ пФ}$$

2.5. Выводы

1. В данном разделе проведено моделирование магнитного поля в программном пакете Comsol Multiphysics двух катушек. Расчеты проходили при разной конфигурации катушек.

2. Зная распределение вектора магнитного потенциала A , по уравнению Гельмгольца составлен алгоритм для вычисления индуктивности и активного сопротивления катушек любой конфигурации. С целью минимизации расчетов была принята простая геометрия катушек, состоящая из двух колец, что подтверждается результатами расчета индуктивности катушки простой формы (2.12). В будущем при проектировании катушек более сложной конфигурации процесс расчета параметров катушки сильно осложняется, т.к. требует решения сложных уравнений.

3. При расчете параметров катушек учитывалось влияние скин-эффекта (рис. 24-25), видно, что в области низких частот плотность тока в поперечном сечении сосредоточена не только на поверхности катушки, но и частично в центре катушки, в то время как в области высоких частот только на поверхности катушки, обуславливая большую часть поперечного сечения катушки неиспользуемой.

4. Все расчеты и модели в текущем разделе нужны для ответа на вопрос, какая часть мощности поступит на принимающую катушку при настройке цепи в резонанс.

РАЗДЕЛ 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ КАТУШКАМИ

Постановка задачи: построить зависимость распределения мощности $P(\omega)$ на приемной катушке в зависимости от частоты. Диапазон частот зададим с шагом $f=10^5$ Гц от начального значения $f_0=100$ Гц до конечных значений $f_k=100$ МГц.

3.1. Моделирование электромагнитных полей для катушек разной конфигурации

В связи с тем, что исследуется методика беспроводной передачи энергии, требуется установить факт возникновения максимума передаваемой мощности при резонансе цепи в принимающей катушке, поэтому в задаче рассматриваются две системы катушек: одна из них состоит из двух колец, в которой на передающее кольцо подается напряжение $U=1$ В, другая система из шести колец, в которой передающей катушкой являются три кольца (рис. 29).

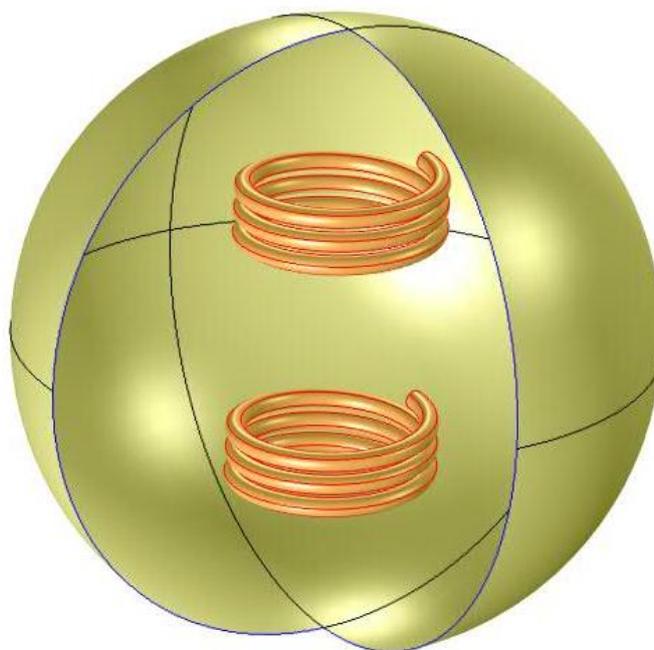


Рисунок 29 – Система двух спиралевидных катушек

Последовательность моделирования магнитных полей, распределение плотности тока в сечениях проводника и вычисление параметров катушки делаем в той же последовательности, что и в разд. 2 настоящей работы.

Моделирование и расчеты проводим в программе Comsol Multiphysics, в основе которого лежит уравнение Гельмгольца для переменного тока $(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon)\mathbf{A} + \nabla\mathbf{H} = \mathbf{J}$. Результаты моделирования для двух случаев приведены на рис. 30-33.

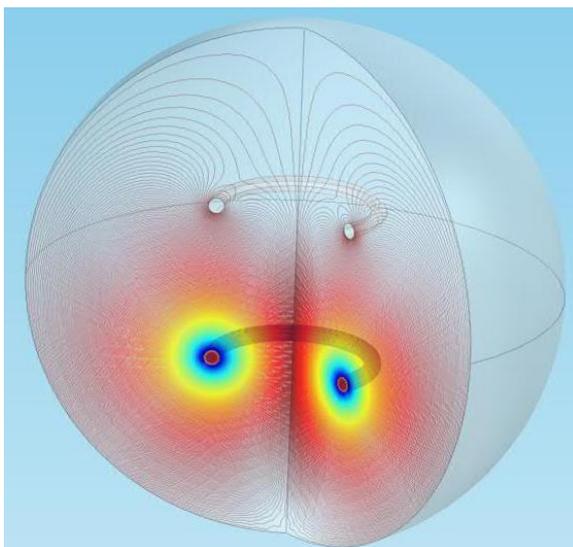


Рисунок 30 – Нормальная составляющая вектора напряженности \mathbf{E} в виде изолиний для системы, состоящей из двух колец

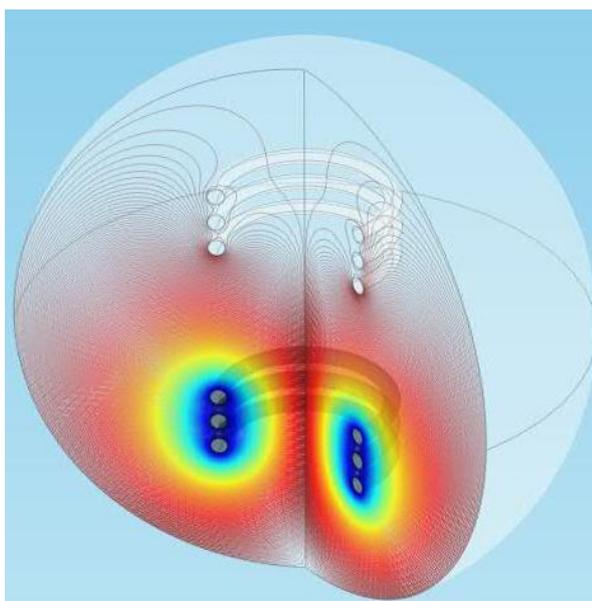


Рисунок 31 – Нормальная составляющая вектора напряженности \mathbf{E} в виде изолиний для системы, состоящей из шести колец

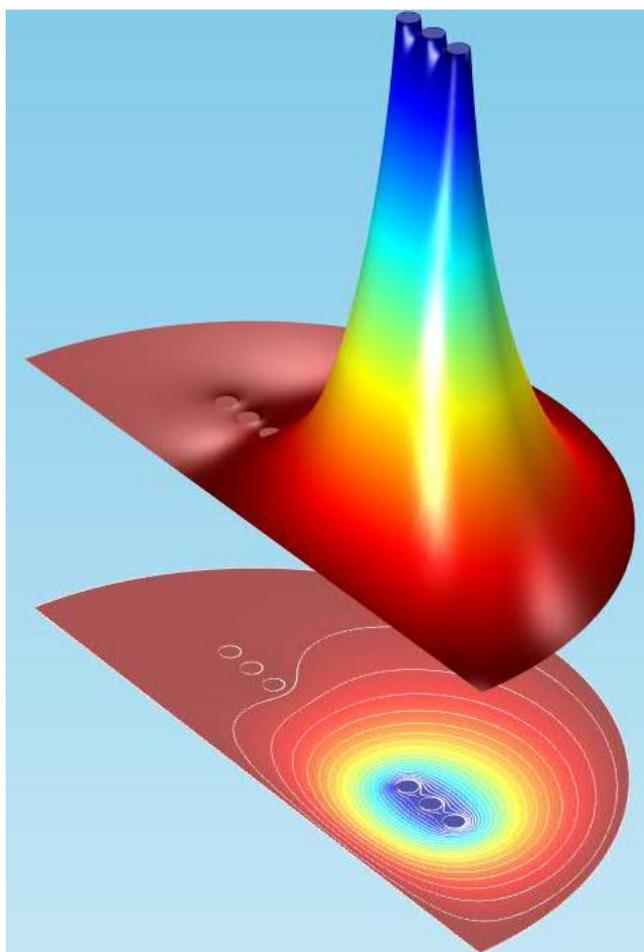


Рисунок 32 – Поле распределения вектора электрической напряженности \mathbf{E} по поверхности катушки

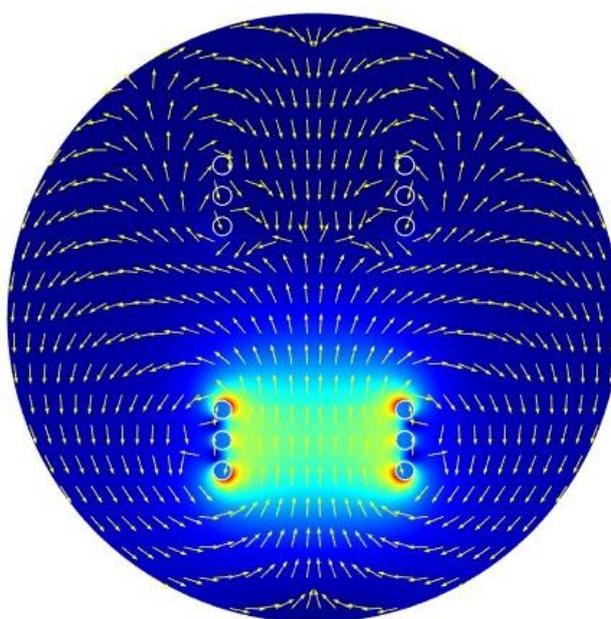


Рисунок 33 – Поле распределения вектора магнитной напряженности \mathbf{H} по поверхности катушки

3.2. Расчет мощности в приемной катушке спиралевидной формы

На основании полученных результатов (рис. 30-33) требуется провести вычисление энергии W , поступающей с передающей катушки на приемную для спиралевидной системы катушек. Вычисление проводим в программе Comsol Multiphysics и сводим в табл. 1. В таблице представлен диапазон частот от 100 кГц до 3 МГц с шагом 100 кГц в целях уменьшения объема записи табличных данных.

Таблица 1 – Результаты расчета энергии в приемной катушке от частоты

f , Гц	W , Дж	f , Гц	W , Дж	f , Гц	W , Дж
1.0001E5	1.6742E-6	1.1000E6	1.3893E-8	2.1000E6	3.8120E-9
2.0001E5	4.1966E-7	1.2000E6	1.1674E-8	2.2000E6	3.4734E-9
3.0001E5	1.8665E-7	1.3000E6	9.9471E-9	2.3000E6	3.1779E-9
4.0001E5	1.0502E-7	1.4000E6	8.5769E-9	2.4000E6	2.9186E-9
5.0001E5	6.7226E-8	1.5000E6	7.4715E-9	2.5000E6	2.6898E-9
6.0001E5	4.6688E-8	1.6000E6	6.5667E-9	2.6000E6	2.4869E-9
7.0001E5	3.4304E-8	1.7000E6	5.8169E-9	2.7000E6	2.3061E-9
8.0001E5	2.6265E-8	1.8000E6	5.1886E-9	2.8000E6	2.1443E-9
9.0001E5	2.0753E-8	1.9000E6	4.6568E-9	2.9000E6	1.9990E-9
1.0000E6	1.6810E-8	2.0000E6	4.2028E-9	3.0000E6	1.8679E-9

Так как мощность это изменение энергии во времени, то выражение мощности, поступающей на приемную катушку, опишется следующим выражением:

$$P(\omega) = \frac{dW(\omega)}{dt} = \frac{dW}{d\omega} \frac{d\omega}{dt} = \omega^2 \frac{dW}{d\omega} \quad (3.1)$$

На основании (3.1) построим зависимости энергии и мощности от частоты (рис. 34-35).

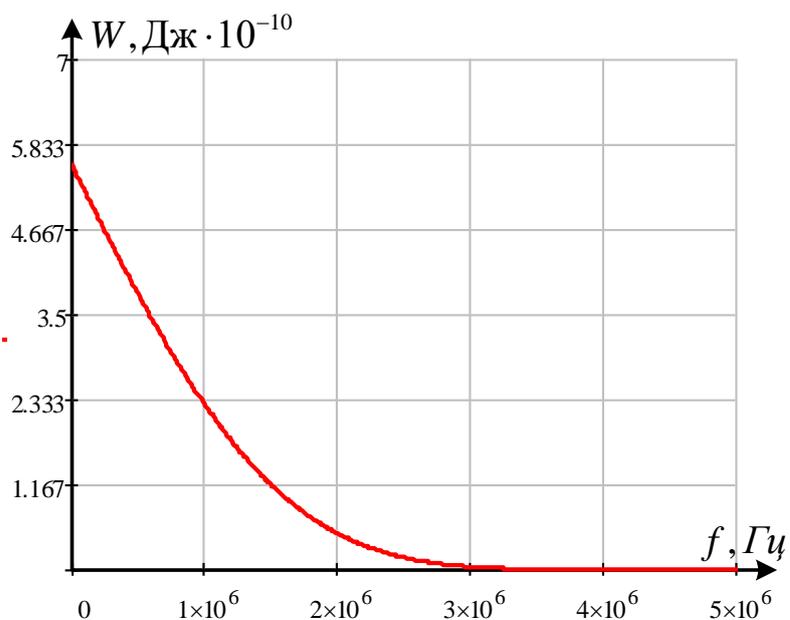


Рисунок 34 – График зависимости поступающей энергии в приемной катушке от частоты

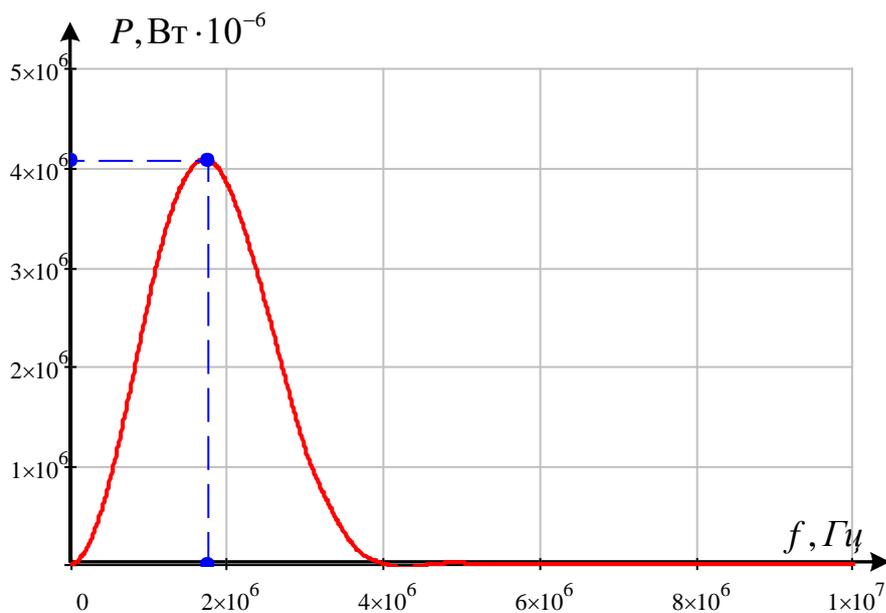


Рисунок 35– График зависимости поступающей мощности в приемной катушке от частоты

По графику (рис. 35) зависимости мощности от частоты, поступающей в приемную катушку, определим на какое значение частоты приходится пик мощности, т.е. резонансную частоту и сравним ее с ранее полученной. Результат расчета представим в виде таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета максимума мощности

$P_{\text{макс}}, \text{Вт}$	$f, \text{МГц}$
4,077	1,74

В заключение раздела приведем основные выкладки по вопросам актуальности внедрения систем беспроводных технологий и оказывающее влияние электромагнитных полей на здоровье человека.

3.3. Внедрение систем беспроводных технологий

Внедрение новых технологий, предназначенных заменить существующие устройства в электронике массового спроса, будет успешным при условии придания им более привлекательных потребительских качеств:

- новое устройство должно быть более удобным в эксплуатации, хотя бы за счет отказа от проводов питания или устранения необходимости заменить батарею;
- устройство должно быть более надежным, что возможно обеспечить, исключив отказы электронных систем, вызванные использованием разъемных соединителей и проводов питания;
- устройство должно быть экологически чистым благодаря отказу от применения одноразовых батарей. Использование сетевой беспроводной структуры для передачи энергии значительно дешевле, а так же не вызывает загрязнение окружающей среды, как при производстве и использовании батарей, созданных на традиционных химических источниках электроэнергии;
- устройство должно обеспечивать повышенную безопасность при использовании, достигается это за счет исключения проводов и разъемов – источников искрообразования. Кроме того, отсутствие разъемов позволяет реализовать устройство в водонепроницаемом исполнении и взрывозащищенном;
- устройство должно быть недорогим. Предполагается возможность зарядки нескольких приборов от одного устройства.

Кроме этого, устройства, поддерживающие беспроводной способ передачи электроэнергии, должны обеспечивать работу в диапазоне мощности от менее 1 Вт (беспроводные датчики и маломощные электронные устройства) до более 3 кВт (промышленные системы и электрические транспортные средства), как в режиме непосредственного использования, например, в светодиодных светильниках, так и в режиме накопления энергии, например, в аккумуляторах, интеллектуальных гаджетов, транспортных средств и т.д.

3.4. Безопасность использования беспроводных технологий

Поскольку в системах беспроводной зарядки невозможно исключить электромагнитное излучение, возникает вопрос, насколько эти системы безопасны для здоровья людей и не подвергаются ли люди воздействию больших и потенциально опасных электромагнитных полей при их использовании.

Ведущую роль при разработке норм и рекомендаций относительно допустимых уровней облучения для человека играет Всемирная организация здравоохранения (далее – ВОЗ). Регламентируют нормы и уровни облучения так же региональные и международные организации, создавая спецификации в соответствии с рекомендациями ВОЗ. В числе таких организаций авторитетный Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и Международная комиссия по неионизирующим излучениям (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP). Один из важнейших показателей – это уровень SAR (Specific Absorption Rate – удельный коэффициент поглощения электромагнитной энергии). Он определяет вредное воздействие электромагнитного облучения на человека. А так же им определяется энергия электромагнитного поля, поглощаемая в тканях тела человека за одну секунду и вызывающая нагрев тканей.

Допустимые значения удельного коэффициента поглощения, рекомендованные Федеральной комиссией связи (Federal Communication Commission, FCC) и комиссией ICNIRP, представлены в таблице 3. Рекомендованные нормы определяют допустимые значения SAR, которые гарантируют отсутствие неблагоприятных последствий для людей, независимо от их возраста и состояния здоровья, при воздействии электромагнитного облучения на разные участки тела.

Таблица 3 – Допустимые значения удельного коэффициента поглощения, рекомендованные FCC и комиссией ICNIRP

Организация	Удельный коэффициент поглощения (SAR), Вт/кг		
	Все тело	Голова, туловище	Конечности
FCC	0,08	1,6 (1 г)	4,0 (10 г)
ICNIRP	0,08	2,0 (10 г)	4,0 (10 г)

В научных исследованиях и докладах, представленных как IEEE, так и ICNIRP, нет подтверждения того, что воздействие радиочастотного (до 300 ГГц) электромагнитного поля вызывает онкологические болезни. Однако, есть ряд доказательств того, что при электромагнитном облучении может повышаться температура всего тела человека или отдельных его участков (органов, тканей). Электромагнитное облучение может также оказывать негативное воздействие на нервную систему, неблагоприятное влияние на сетчатку глаза, стимулировать мышечные ткани.

Многочисленные исследования (IEEE, ICNIRP) показали, что при воздействии излучения даже на самые чувствительные участки тела при среднем уровне SAR менее 4 Вт/кг негативные последствия не проявляются. Однако, это может приводить к повышению температуры тела максимум на один градус при нормальных условиях окружающей среды. Тем не менее, чтобы обеспечить «запас прочности» (на случай, что сегодняшние научные данные не точны) и, чтобы успокоить общественное мнение, IEEE и ICNIRP рекомендовали установить значение SAR на уровне менее 0,4 Вт/кг для

работников в сфере производства, и 0,08 Вт/кг – для массового потребителя. В таблице 3 приведены рекомендованные значения SAR для некоторых участков тела человека.

Конструкция и принцип работы беспроводных зарядных устройств обеспечивают высокий уровень безопасности. Эффективный радиус действия современных систем не превышает нескольких десятков миллиметров, а мощность электромагнитного излучения быстро затухает при удалении от источника. Поэтому беспроводные зарядные устройства не опаснее, чем привычные микроволновые печи и мобильные телефоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей выпускной квалификационной работе проведено изучение технологии беспроводной передачи энергии между двумя катушками. Несмотря на то что, данная технология в России не имеет должно уровня исследования и описания, она является перспективной в развитии интеллектуальных систем.

В первом разделе рассмотрены основные методы беспроводной передачи энергии, основные преимущества и недостатки. Немало важную роль играет применение каждого из этих методов в реализации в повседневной жизни, будто это промышленная сфера или наукоемкая отрасль.

Наиболее перспективным методом изучения беспроводной передачи энергии является метод электромагнитной индукции при условии возникновения резонанса между индуктивно связанными контурами. Установлено, что индуктивно-связанные контура могут иметь сильную или слабую связь, которая характеризуется коэффициентом связи k , зависящим от геометрии катушек, их конфигурации и взаимного расположения. Установлено, что важным свойством индуктивно связанных цепей является их добротность, которое характеризует «избирательные свойства цепей». Чем больше добротность контура, тем лучшей селективностью обладает контур. В работе рассматривается система, имеющая слабую связь контуров, когда величина $kQ \ll 1$, т.к. селективность цепи сводится в малую ширину полосы пропускания контура.

Для моделирования беспроводной передачи энергии использовался программный пакет Comsol Multiphysics, основанный на методе конечных элементов, с целью выявления основных параметров передающей и приемной катушки в зависимости от диапазона частот. Т.к. моделирование проходило в высокочастотном диапазоне, учитывалось явление скин-эффекта. По результатам моделирования, видно, что при увеличении частоты

плотность распределения тока у поверхности катушки возрастало и не охватывало основную часть поперечного сечения проводника. Для вычисления в частотном диапазоне индуктивности и активного сопротивления катушки построены поля вектора магнитного потенциала A для разных конфигураций катушек по уравнению Гельмгольца. Погрешность при расчете индуктивности экспериментальным и аналитическим путем составляет меньше 2%, что свидетельствует о правильности расчетах. Таким образом, создан алгоритм, позволяющий моделировать электромагнитные поля и проводить сложные вычисления параметров катушек при учете их сложной конфигурации и взаимного расстояния между ними.

На заключительном этапе работы проведены исследования по передаче энергии с передающей катушки на приемную катушку, в результате чего получили график, на котором четко прослеживается максимум передаваемой мощности в приемную катушку при резонансной частоте. Расчет резонансной частоты, проведенный в разделе 2, удовлетворительно совпал с резонансной частотой при максимальной передаче мощности (рис. 36). Работа требует дальнейших исследований для сведения ошибки к минимуму.

Так как методика по определению передаваемой мощности беспроводным путем еще до конца не исследована, стоит отметить важность проведения данных исследований, т.к. век высоких технологий переживает бурную революцию, как за рубежом, так и в России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Запасный А.И. Основы теории цепей: Учебное пособие. – М.: РИОР, – 2006. – 336 с. – (Высшее образование).
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.: ил.
3. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.: ил.
4. A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. Science, 2007, v. 317 (5834), pp. 83-86.
5. A. Karalis, J.D. Joannopoulos, M. Soljacic. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. Annals of physics, 2007, V.323, Is. 1, pp.34-48.
6. I. Away, Y. Zhang. Coupling coefficient of resonators – an intuitive way of its understanding. Electronics and Communication in Japan, p. 2, V. 90, No. 9, 2007.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. 8: Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1992. – 664 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. 2: Теория поля. – М.: Наука, 2001. – 533 с.
9. Тамм И.Е. Основы теории электричества. –М.: Физматлит, 2003. – 616 с.
10. R. Ving. Wireless energy transfer by resonant inductive coupling. Master of science thesis. Sweden, Goteborg, – 2015, p.83.
11. Сайт компании разработчика пакета Comsol Multiphysics. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.comsol.com>
12. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. – 393 с.

13. Введение в Comsol Multiphysics 5.2. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.comsol.ru>
14. Технология беспроводной зарядки. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru>
15. Технология беспроводной зарядки: принцип действия, стандарты, производители. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru>
16. Kamil A. Grajski, R. Tseng, C. Wheatley. Qualcomm Incorporated. Loosely-coupled wireless power transfer: physics, circuits, standards. – IEEE, 2012.