

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Булатов Андрей Алексеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Методы измерения скин-эффекта

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19362

Научный руководитель:

Туманов Сергей Витальевич

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Рева Владимир Борисович

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью данной работы являлось определение возможности измерения скин-эффекта в цилиндрическом проводнике несколькими методами: методом экранирования и резонансным методом.

Метод экранирования основан на ослаблении переменного магнитного поля внутри полого проводника. Он позволяет исследовать скин-эффект в цилиндрических экранах.

Для изучения скин-эффекта непосредственно в проводнике был предложен метод измерения на основе экспериментального определения добротности – резонансный метод. Измерения возможно проводить с помощью последовательного и параллельного контура. Были исследованы оба варианта. Для последовательного контура была найдена зависимость напряжения от частоты на конденсаторе, сначала для одной обмотки катушки, а потом для двух. Были построены по этим зависимостям АЧХ в районе резонансных частот. По АЧХ были вычислены добротности контуров, и через определение добротности были получены значения сопротивления провода катушки на данных частотах. А так как зависимость сопротивления от частоты определяется самим скин-эффектом, то с легкостью можно получить оценку толщины скин-слоя.

Ключевые слова: метод экранирования, резонансный метод, индукционный датчик, АЧХ в районе резонансных частот, добротность контура.

Оглавление

| | |
|--|----|
| 1. Введение..... | 4 |
| 2. Теоретическая часть..... | 4 |
| 2.1. Проводник в переменном поле..... | 4 |
| 2.2. Экранирование внешнего переменного магнитного поля..... | 6 |
| 2.3. Резонансный метод измерения скин-эффекта..... | 6 |
| 3. Постановка задач..... | 10 |
| 3.1. Метод экранирования..... | 10 |
| 3.2. Резонансный метод..... | 12 |
| 3.2.1. Последовательный контур..... | 13 |
| 3.2.2. Параллельный контур..... | 15 |
| 3.2.3. Тангенс потерь..... | 17 |
| 4. Полученные АЧХ..... | 18 |
| 4.1. Параллельный контур..... | 18 |
| 4.2. Последовательный контур..... | 20 |
| 5. Вычисления..... | 21 |
| 5.1. Параллельный контур..... | 21 |
| 5.2. Последовательный контур..... | 21 |
| 6. Заключение..... | 22 |
| 7. Список используемой литературы..... | 22 |

1. Введение

Существует несколько методов измерения скин-эффекта. В этой работе были рассмотрены два из них: метод ослабления поля внутри экрана и резонансный метод.

Поставим на пути равномерного переменного магнитного поля медный цилиндр. В нем возбуждятся переменные ЭДС, которые, в свою очередь, создадут переменные индукционные вихревые токи (токи Фуко). Магнитное поле этих токов будет замкнутым; внутри цилиндра оно будет направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами – в ту же сторону, что и возбуждающее поле. Результирующее поле оказывается ослабленным у цилиндра и усиленным вне его, т.е. происходит вытеснение поля из пространства, занимаемого цилиндром, в чем и заключается его экранирующее действие, которое будет тем эффективнее, чем меньше электрическое сопротивление цилиндра, т.е. чем больше протекающие по нему вихревые токи.

Благодаря скин-эффекту плотность вихревых токов и напряженность переменного магнитного поля по мере углубления в металл падает по экспоненциальному закону. Теорию принципа экранирования можно использовать для измерения величины скин-эффекта. Также исходя из экспериментального определения добротности колебательного контура, которая может меняться за счет того, что омическое сопротивление провода меняется с частотой из-за возникающего в нём скин-эффекта, можно сделать оценку величины этого эффекта. Исследуем оба этих метода и проверим их применимость.

2. Теоретическая часть

2.1. Проводник в переменном поле

Из уравнений Максвелла следует, что переменное электрическое поле приводит к появлению вихревого магнитного поля и наоборот. В приближении в рассматриваемой нами задаче вихревое электрическое поле

создается изменением магнитного поля, а вихревое магнитное поле создается только вихревыми токами (токами Фуко), текущими по проводнику.

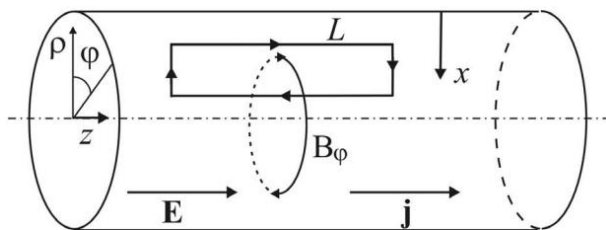


Рис.1. Проводник в переменном поле.

Поскольку магнитный поток через контур L (рис. 1) изменяется со временем, то циркуляция напряженности электрического поля E по этому контуру будет отличаться от нуля. Используя правило, по которому определяется направление циркуляции, находим, что при возрастании магнитного потока направление индуцированного электрического поля будет таким, как это изображено на контуре стрелками, а значит, что индуцированное электрическое поле будет ослаблять исходное поле вблизи оси и увеличивать его на периферии провода.

Из этого качественного описания электромагнитной индукции для переменного тока в проводе ясно, почему переменное электромагнитное поле не проникает внутрь проводников, а сосредоточивается вблизи поверхности. Слой, в котором сосредоточено поле, называют скин-слоем (от англ. skin – кожа), а эффект вытеснения поля на поверхность проводника – скин-эффектом. Этот эффект существует не только в том случае, когда к концам проводника приложена разность потенциалов, но и тогда, когда проводник находится в созданном любым способом внешнем переменном электромагнитном поле.

Плотность тока максимальна у поверхности проводника. При удалении от поверхности она убывает экспоненциально и на глубине δ становится меньше в e раз (примерно на 70 %). Эта глубина называется толщиной скин-слоя и на основании этой величины мы и будем делать оценку скин-эффекта во взятом экране при данной частоте магнитного поля.

Если толщина скин-слоя сравнима с радиусом цилиндра или проводника, то его называют слабым скин-эффектом, а если же толщина скин-слоя значительно меньше, чем характерные размеры проводника, то – сильным.

2.2. Экранирование внешнего переменного магнитного поля

Одним из методов исследования скин-эффекта является определение ослабления переменного поля методом экранирования. В эксперименте использовался замкнутый пустотелый проводник (рис.2). Такое «тело» эффективно экранирует переменное внешнее поле при высоких частотах ω , для которых толщина скин-слоя значительно меньше толщины стенки.

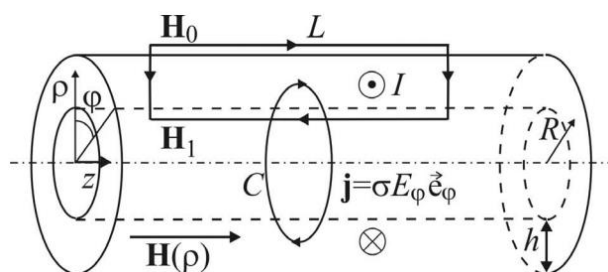


Рис.2. Явления в экране при переменном магнитном поле.

Рассмотрим процессы протекающие в этом теле, когда по оси z существует переменное магнитное поле внутри цилиндра. Это переменное магнитное поле создаст электрическое поле внутри проводника направленное по часовой стрелке. Внутри возникают так называемые токи Фуко. Как раз эти токи и оказывают влияние на магнитное поле, ослабляя его внутри цилиндра.

При сильном же скин-эффекте он характеризуется толщиной скин-слоя, которую мы можем найти по формуле:

$$\delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\mu\omega}},$$
 где μ – магнитная проницаемость проводника, которую мы в условиях этой задачи берём за 1.

2.3. Резонансный метод измерения скин-эффекта

Помимо метода с экранированием поля существует метод с измерением скин-эффекта в проводнике через добротность резонансного контура на разных частотах.

Метод, состоящий в экспериментальном определении активного сопротивления цилиндрического проводника переменному току различной частоты. Для проведения эксперимента на параллельном контуре цилиндрический проводник (провод) свернут в катушку, коэффициент самоиндукции L , а активное сопротивление R_L . Параллельно этой катушке подключается конденсатор с емкостью C . В образованном таким образом параллельном колебательном контуре при совпадении частоты напряжения, подаваемого на контур, с его собственной частотой, имеет место резонанс токов (токи, текущие в индуктивной и в емкостной ветвях контура становятся максимальными и противофазными). При этом максимума достигает и напряжение на контуре. Принципиальная схема представлена на рисунке 3.

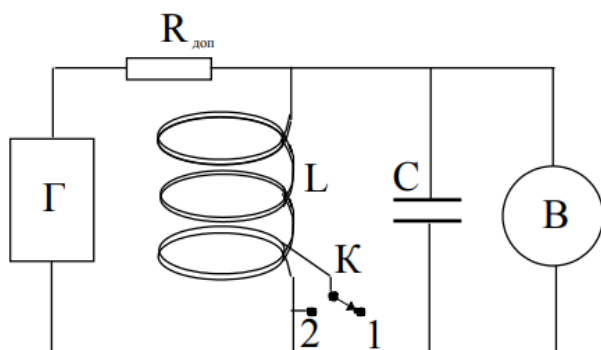


Рис.3. Параллельный колебательный контур с двойным витком.

Также исследуем данный метод на последовательном контуре (рис.4). Цилиндрический проводник (провод) свернут в катушку (соленоид), коэффициент самоиндукции которой L и не изменяется в ходе эксперимента, а активное сопротивление катушки R_L .

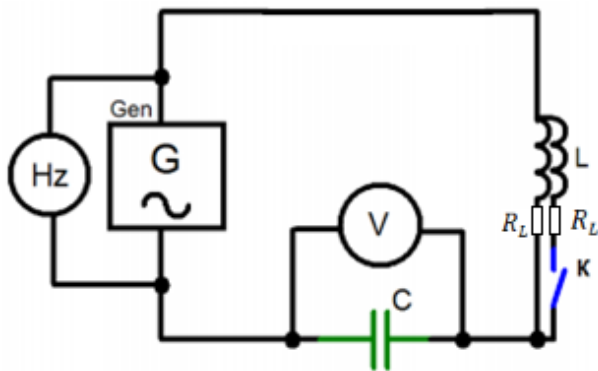


Рис.4. Схема измерений для последовательного контура

Последовательно с катушкой подключен конденсатор с емкостью C . Колебательный контур, образованный таким образом, подключен к генератору высокочастотного синусоидального напряжения. При совпадении частоты напряжения, подаваемого на контур, с его собственной частотой, имеет место резонанс. При этом напряжение на емкости C в контуре оказывается наибольшим и во много раз превосходящим напряжение источника

Добротность параллельного контура, как и последовательного, связана с его параметрами следующим образом:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1).$$

Здесь сопротивление R является эквивалентным, которое для последовательного контура подключено последовательно к контуру, а для параллельного – в самом контуре, последовательно к соленоиду или к конденсатору. Представим это сопротивление в виде:

$$R = R_L + R_X,$$

где R_L – активное сопротивление катушки, меняющееся с изменением частоты; R_X – сопротивление, учитывающее все остальные потери в контуре и не зависящее от частоты.

Для того, чтобы в сопротивлении R выделить его часть, относящуюся только к активному сопротивлению катушки R_L , последняя намотана ”в два провода”, бифилярно (при этом ”начало” одной обмотки соединено с ”началом” другой и, соответственно, ”конец” одной обмотки соединен с

”концом” другой обмотки – таким образом, по этим обмоткам текут параллельные токи). Такая конструкция катушки позволяет изменять ее активное сопротивление в два раза путем использования одной или двух ее обмоток. При этом индуктивность катушки практически не изменяется. Впредь символом R_L будем обозначать сопротивление одной обмотки катушки. Тогда сопротивление двух параллельных обмоток будет в два раза меньше: $R_L/2$.

Если на какой-либо частоте экспериментально измерить добротность контура с одной обмоткой (Q') и добротность контура с двумя обмотками (Q'') и использовать формулы

$$Q' = \frac{1}{R'} \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ и } Q'' = \frac{1}{R''} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

где $R' = R_L + R_X$, $R'' = R_L/2 + R_X$, то для интересующей нас величины активного сопротивления одной обмотки получается:

$$R_L = 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \left(\frac{1}{Q'} - \frac{1}{Q''} \right) \quad (2).$$

Сопротивление одной обмотки на постоянном токе можно рассчитать по формуле:

$$R_{L\text{пост}} = \rho \frac{l}{S}$$

Скин-эффект можно интерпретировать как увеличение сопротивления проводника переменному току вследствие уменьшения эффективной площади поперечного сечения проводника, т. е.

$$\frac{R_{\text{пер}}}{R_{\text{пост}}} = \frac{\rho \frac{l}{S_{\text{пер}}}}{\rho \frac{l}{S_{\text{пост}}}} = \frac{S_{\text{пост}}}{S_{\text{пер}}}$$

где $R_{\text{пер}}$ и $R_{\text{пост}}$ – сопротивление проводника на переменном и постоянном токе соответственно, $S_{\text{пост}} = \pi r^2$ – площадь полного поперечного сечения проводника радиусом r , $S_{\text{пер}}$ – площадь поперечного сечения цилиндрического слоя, ограниченного окружностями с радиусами r и $r - \delta$. На основании этого соотношение можно выразить толщину скин-слоя:

$$\delta = r \left(1 - \sqrt{1 - \frac{R_{L\text{пост}}}{R_{L\text{перем}}}} \right)$$

При $R_{L\text{пост}} \ll R_{L\text{перем}}$ выражение можно переписать в упрощенном виде:

$$\delta \approx \frac{r}{2} * \frac{R_{L\text{пост}}}{R_{L\text{перем}}} \quad (3)$$

По этой формуле мы и будем оценивать силу скин-эффекта согласно данному методу.

3. Постановка задач

3.1. Метод экранирования

Принципиальная схема экспериментальной установки для проведения измерений методом ослабления поля экраном изображена на рис. 4.

Сигналы регистрируются с помощью двухлучевого цифрового осциллографа TDS 1012. В качестве источника переменного тока для питания соленоида можно использовать генератор ГЗ-33 или цифровой генератор GFG-8255A.

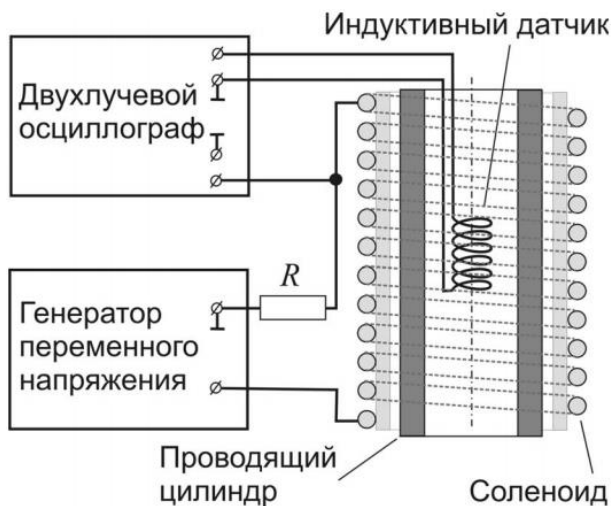


Рис.5. Схема установки для проведения измерений методом экранирования

Соленоид длиной l с числом витков N питается от генератора гармонических колебаний. Внутри генератора может вставляться проводящий цилиндр и измерительная катушка, имеющая n витков. Последовательно с соленоидом установлено сопротивление R , служащее для контроля тока, протекающего через соленоид. Падение напряжения (U_R) на этом сопротивлении пропорционально магнитному полю, создаваемому

соленоидом. С изменением частоты ток через соленоид может меняться, даже если поддерживать напряжение генератора постоянным, поскольку импеданс схемы зависит от частоты приложенного напряжения.

Напряжение, снимаемое с измерительной катушки (U_n), пропорционально величине магнитного поля на оси соленоида и зависит от частоты и наличия или отсутствия проводящего экрана. Оба напряжения (U_r) и (U_n) регистрируются двухлучевым цифровым осциллографом, позволяющим измерять как величину сигналов, так и сдвиг фаз между внешним полем и полем внутри экрана.

Чтобы проводить измерения данным методом нужно сначала без экрана подать ток на соленоид и снять показания напряжений на резисторе и на индукционном датчике. Далее подать сигнал на соленоид уже с проводником и также снять показания. Согласно теории, напряжение на индукционном датчике во втором случае должно быть меньше и спадать с увеличением частоты подаваемого на соленоид тока. Это будет следствием скин-эффекта возникающего в проводнике и ослабляющем поле внутри. А так как при увеличении частоты скин-эффект усиливается, то и поле внутри должно уменьшаться.

3.2. Резонансный метод

Рассмотрим метод исследования скин-эффекта в проводе на основе определения добротности колебательного контура.

Суть эксперимента по такому метод заключается в измерении АЧХ на одной резонансной частоте сначала с одной обмоткой катушки индуктивности, далее уже с двойным витком снова померить АЧХ. Далее можно экспериментально вычислить добротность по графикам, как

($Q = \frac{f}{\Delta f}$ (4)) где f - резонансная частота а Δf – разность частот, при которых

амплитуда спадает на $1/\sqrt{2}$. И из определения добротности найти активное сопротивление катушки на данной частоте. По нескольким таким измеренным

сопротивлениям по формуле найти глубину проникновения тока, и оценить скин-эффект.

Найдём зависимость амплитуды напряжений от частоты аналитически. Далее уже по этим зависимостям построим АЧХ, по которым и будем производить дальнейшие измерения.

Для того чтобы найти зависимость нужно знать значение всех элементов цепи: индуктивность катушки, ёмкость соленоида и сопротивление провода. Найдём теоретическое сопротивление провода на частотах: 1, 10, 20, 50, 100 кГц. Будем пользоваться общей формулой:

$$R = \frac{l}{ca} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\sigma}} \operatorname{Re}\left((1+i) \frac{J_0(ka)}{J_1(ka)}\right),$$

где l – длина проводника, c – скорость

света, a – радиус проводника, ω – циклическая частота ($\omega = 2\pi f$), σ – проводимость проводника, J_0, J_1 – функции Бесселя 0-ого и 1-ого порядка соответственно, а $k = (1+i) \frac{\sqrt{2\pi\sigma\omega}}{c}$. Был взят медный проводник ($\sigma = 5,4 * 10^{17} \text{с}^{-1}$) длиной – 157см, радиусом – 1мм. Его постоянное сопротивление ($R = \frac{\rho l}{S}$) равно – 0,0074Ом. А вычисленное при данных частотах соответственно – 0,0083, 0,0092, 0,0112, 0,017, 0,0225 Ом.

Индуктивность катушки с этим проводом посчитанная по формуле:

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S,$$

где μ_0 - магнитная постоянная ($12,57*10^{-7}$ Гн/м), равняется

2,5мкГн. При числе витков – 50, а радиусе – 1см.

Ёмкость можем найти из резонансной частоты и её условия:

$$2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

так как мы знаем L и f .

Запишем нужные для получения зависимости и вычисленные данные в таблицу.

| f , кГц | C , мФ | R теоретическое, мОм |
|-----------|----------|------------------------|
| 1 | 10,14 | 8,3 |

| | | |
|-----|--------|--------|
| 10 | 0,1 | 9,234 |
| 20 | 0,025 | 11,2 |
| 50 | 0,0041 | 16,744 |
| 100 | 0,001 | 22,5 |

Таблица 1. Ёмкости и сопротивления используемые в измерениях

Теперь, когда мы знаем недостающие величины можем найти зависимость напряжения от частоты и построить АЧХ.

3.2.1. Последовательный контур

Рассмотрим проведения эксперимента на примере последовательного контура. Чтобы построить АЧХ запишем импеданс контура (рис.6): $z = R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C}$. Тогда его модуль: $|z| = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2 - 2\frac{L}{C} + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$. АЧХ – это зависимость амплитуды (в данном примере на конденсаторе) от частоты, и она

равна: $|U_c| = \frac{\frac{|U|}{2\pi f C}}{\sqrt{R^2 + (2\pi f)^2 L^2 - 2\frac{L}{C} + \frac{1}{(2\pi f)^2 C^2}}$ (5), где U – напряжение на контуре, R –

сопротивление проводника катушки. Теперь, зная все элементы, мы можем построить АЧХ по данной зависимости. Однако при работе с последовательным контуром на практике существует следующая проблема: собственное сопротивление генератора оказывается гораздо больше сопротивления проводника катушки. Это означает, что в реальном эксперименте на последовательном контуре на графике АЧХ не будет так хорошо выражен резонанс, это из-за очень низкой добротности контура. Вернее, никакого резонанса вообще не произойдёт. Построим для такого контура расчётное АЧХ (рис.6) примем напряжение на генераторе за 10В, и возьмём ёмкость и сопротивления для частоты 1 кГц, а сопротивление генератора 100 Ом.

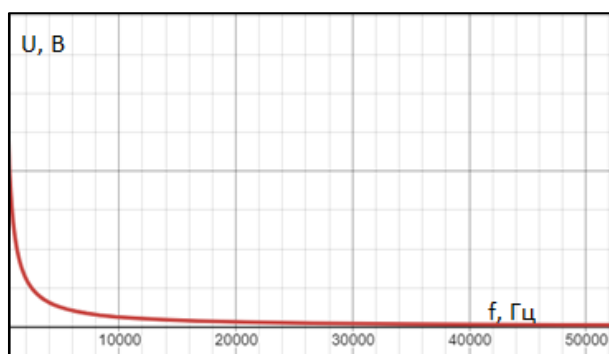


Рис. 6. АЧХ реального последовательного контура

Около 50кГц не наблюдается скачка из-за сверхнизкой добротности. Можно сделать вывод, что проводить измерения на последовательном контуре будет проблематично, так как собственное сопротивление генератора будет складываться с много большим сопротивлением R. Однако картинку можно улучшить, используя делитель напряжений (рис.7) который понизит сопротивление генератора.

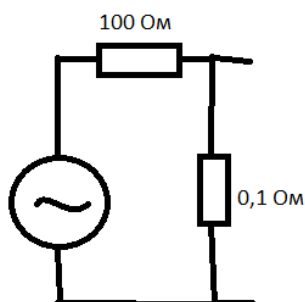


Рис.7. Делитель напряжений

Теперь построим АЧХ (на резонансных частотах 1, 50 и 100 кГц) для этой схемы (рис.8), чтобы понять её применимость к данному методу.

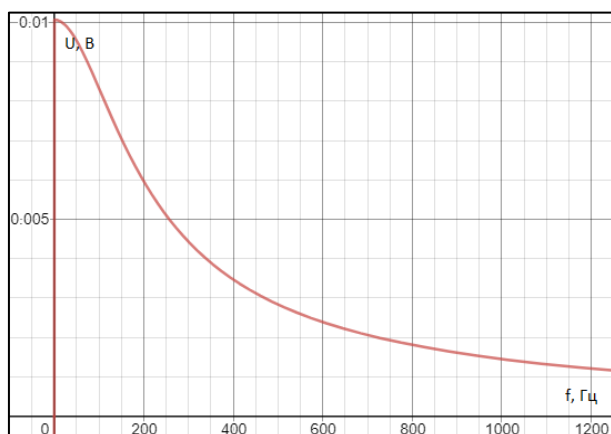


Рис. 8. АЧХ с делителем напряжений (рис.7) для 1кГц

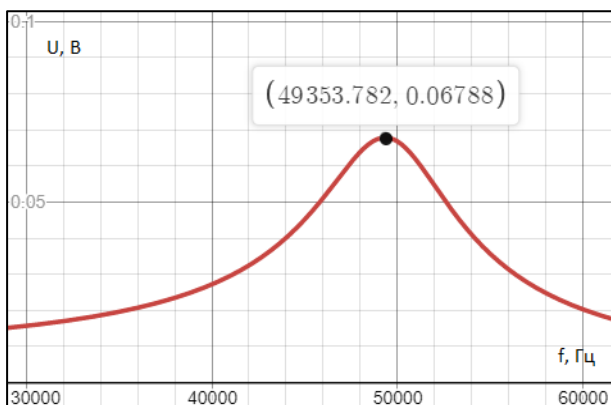


Рис. 9. АЧХ с делителем напряжений для 50 кГц(рис.7)

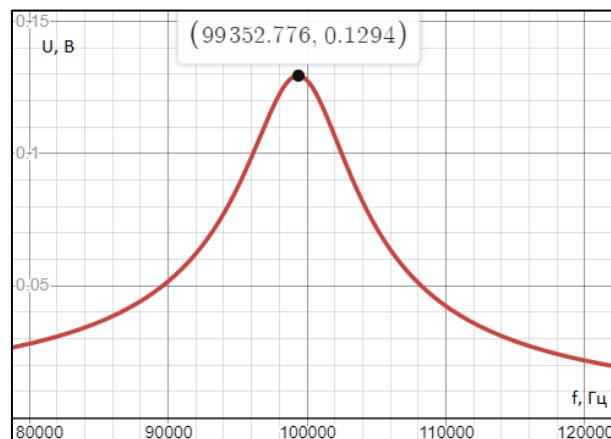


Рис. 10. АЧХ с делителем напряжений для 100 кГц(рис.7)

Видно, что резонанс на этих АЧХ выглядит лучше предыдущего результата, можно сделать предположение что, дальше уменьшая сопротивление на делителе можно добиться практически нулевого собственного сопротивления генератора. Однако напряжение на контуре сильно упало (в 1000 раз), следовательно, в реальном эксперименте измерять напряжение будет довольно трудно, а дальше уменьшая сопротивление на делителе ток и вовсе не побежит через контур. Также можно заметить, что с увеличением частоты АЧХ имеет более выраженный резонанс. Можно сделать вывод, что пользоваться данным способом, в целях уменьшить собственное сопротивление генератора, имеет смысл только на больших частотах, так как на них резонансное напряжение будет достаточно большим, чтобы его можно было измерить.

3.2.2. Параллельный контур

Измерение скин-эффекта резонансным методом возможно также с использованием параллельного колебательного контура (рис.3). Найдём зависимость напряжения от частоты в таком контуре. Запишем импеданс:

$$z = R + \frac{\frac{i\omega L+r}{i\omega C}}{i\omega L+r+\frac{1}{i\omega C}}$$

Тогда его модуль равен $-\left(\sqrt{\left(\frac{\omega L-r^2\omega-\omega^3L^2C}{r^2\omega^2C^2+(\omega^2LC-1)^2}\right)^2 + \left(\frac{r-r\omega^2LC}{r^2\omega^2C^2+(\omega^2LC-1)^2} + R\right)^2}\right)$

Теперь, также как и для последовательного находим модуль тока, умножив который на модуль импеданса самого контура найдём зависимость напряжения на контуре от частоты:

$$|U_{\text{контур}}| = \frac{|U| * \sqrt{\left(\frac{2\pi fL-r^22\pi f-(2\pi f)^3L^2C}{r^2(2\pi f)^2C^2+((2\pi f)^2LC-1)^2}\right)^2 + \left(\frac{r-r(2\pi f)^2LC}{r^2(2\pi f)^2C^2+((2\pi f)^2LC-1)^2}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{2\pi fL-r^22\pi f-(2\pi f)^3L^2C}{r^2(2\pi f)^2C^2+((2\pi f)^2LC-1)^2}\right)^2 + \left(\frac{r-r(2\pi f)^2LC}{r^2(2\pi f)^2C^2+((2\pi f)^2LC-1)^2} + R\right)^2}} \quad (6), \quad \text{где } U -$$

напряжение генератора, r – сопротивление проводника катушки, R – последовательно соединённое с контуром сопротивление. Сопротивление R берём очень большим в сравнении с соб. сопротивлением генератора (50кОм), поэтому влияние сопротивления генератора минимальны в отличие от последовательного. Построим Оценочное АЧХ для параллельного контура (рис.9), по вычисленным зависимостям при r и $r/2$. Возьмём напряжение генератора – 10 В, индуктивность катушки за 2,5мкГн, резонансную частоту за 50 кГц, и для неё соответствующие C и r (0,0041млФ и 16,7 мОм).

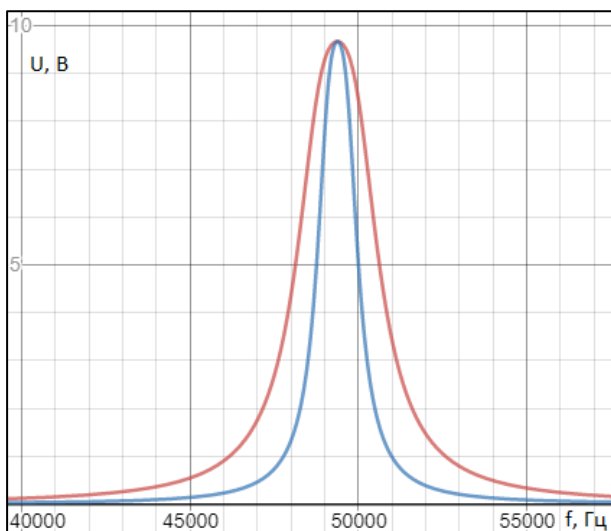


Рис.11. Оценочное АЧХ для параллельного контура (красная – для r , синяя – $r/2$)

Как видно пик резонансной частоты явно выражен, а отмеченное синим цветом, АЧХ для $r/2$ уже чем для r , что говорит об увеличении добротности, как и должно быть. Так как построенное АЧХ основано на реальной схеме можно сделать вывод, что измерение скин-эффекта с помощью параллельного контура действительно возможно.

3.2.3. Тангенс потерь

Также существует ещё один эффект, который может вносить изменения в цепь, будь то последовательный или параллельный контур. Он связан с так называемым “тангенсом потерь”. Способность диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле обычно характеризуют углом диэлектрических потерь, а также тангенсом угла диэлектрических потерь. Эти потери будут приводить к уширению резонансной кривой и поэтому АЧХ для случая одной и двух катушек могут оказаться близки и придется измерять эту разницу напряжений и частот.

При переменном напряжении протекает ток, опережающий по фазе приложенное напряжение на угол ϕ , меньший 90° на небольшой угол δ , обусловленный наличием активного сопротивления.

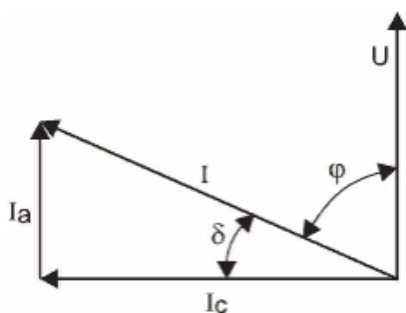


Рис.12. Угол диэлектрических потерь

Отношение активной составляющей тока I_a к емкостной составляющей I_c называется тангенсом угла диэлектрических потерь и выражается в процентах.

Оценим эквивалентное сопротивление конденсатора по тангенсу потерь. Воспользуемся формулой: $tg(\delta) = r\omega C$, действительной для последовательного соединения конденсатора. Тогда при частоте 10 кГц, $C = 4\text{млФ}$, сопротивление конденсатора сравнивается с 0.005 Ом (сопротивлением провода при этой частоте) при тангенсе потерь равным 0,2, что считается достаточно большим показателем. Подобный тангенс потерь имеют алюминиевые электролитические конденсаторы. У нас же в работе рассматриваются обычные конденсаторы, как плёночные или керамические, поэтому будем считать, что сопротивление конденсатора много меньше сопротивления проводника соленоида.

4. Полученные АЧХ

4.1. Параллельный контур

Теперь, когда мы оценили все величины, можем проверить применимость данных методов. Сначала, используя полученные зависимости (5) и (6), построим АЧХ. Будем использовать параллельный контур, так как измерения на нём выглядят более физически обоснованными. Строить будем для частот, ёмкостей и сопротивлений из таблицы 1. Получились следующие графики, по которым и будем проводить дальнейшие измерения, где красный график – для r , а синий – для $r/2$.

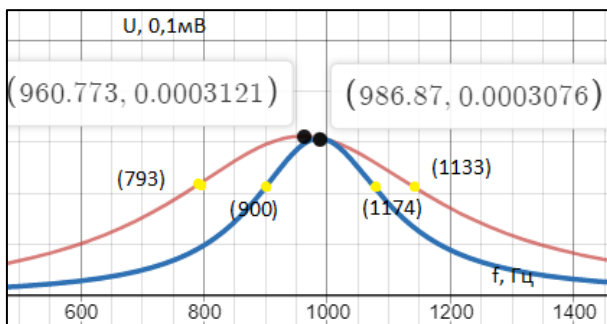


Рис. 13. АЧХ, параллельный контур, 1кГц, чёрные точки – резонансные частоты, жёлтые спадания амплитуды на 0,7.

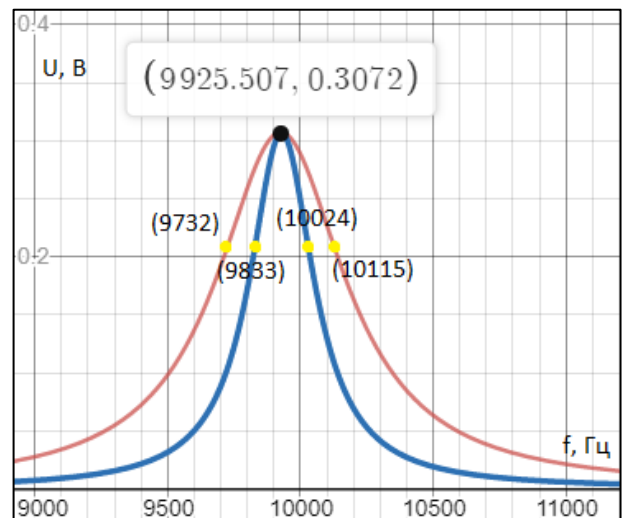


Рис.14. АЧХ, параллельный контур, 10кГц, также как и на предыдущем чёрные точки – рез. частота, жёлтые – спад амплитуды на 0,7.

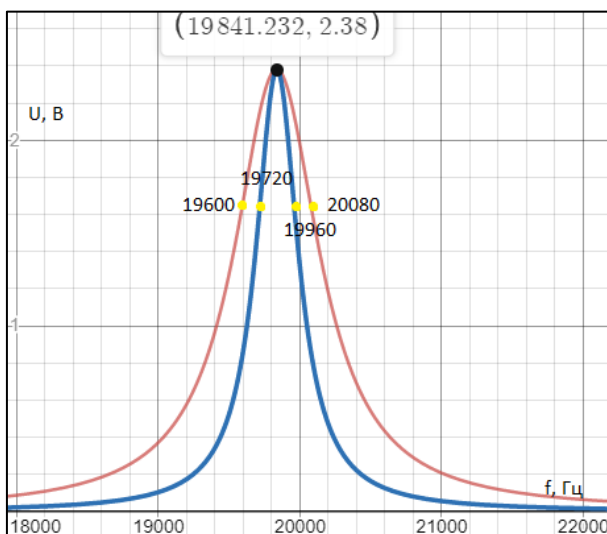


Рис. 15. АЧХ, параллельный контур, 20кГц.

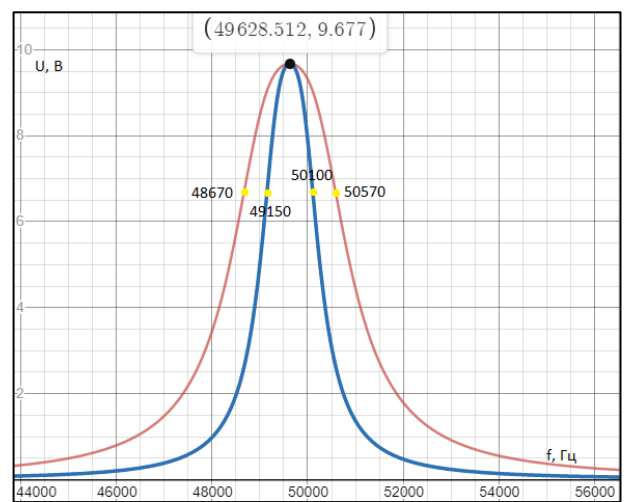


Рис. 16. АЧХ, параллельный контур, 50кГц.

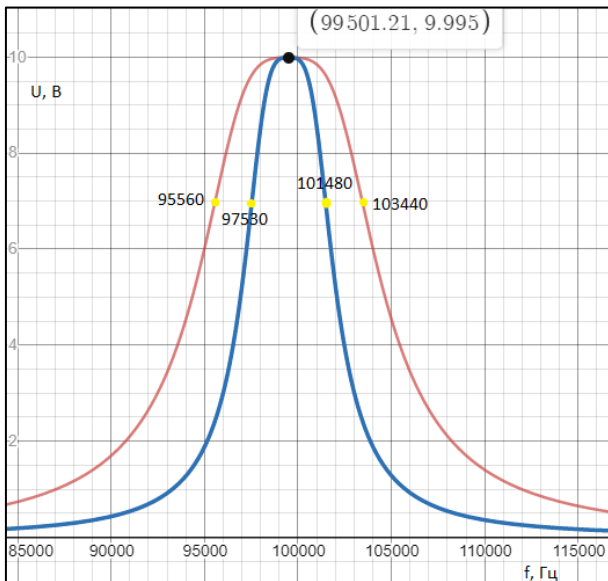


Рис. 17. АЧХ, параллельный контур, 100кГц.

График для 1кГц получился плохой, т. е. амплитуда резонанса очень мала (меньше милливольт). Можно сделать вывод, что на такой частоте реальные измерения даже на параллельном контуре маловероятны.

4.2. Последовательный контур

Реальные вычисления на последовательном контуре невозможны, но всё же для оценки построим АЧХ последовательного контура для соб. сопротивления генератора равным 0.

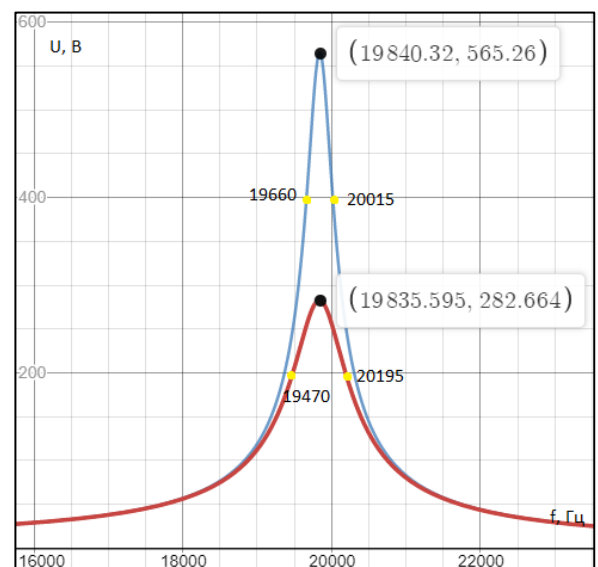
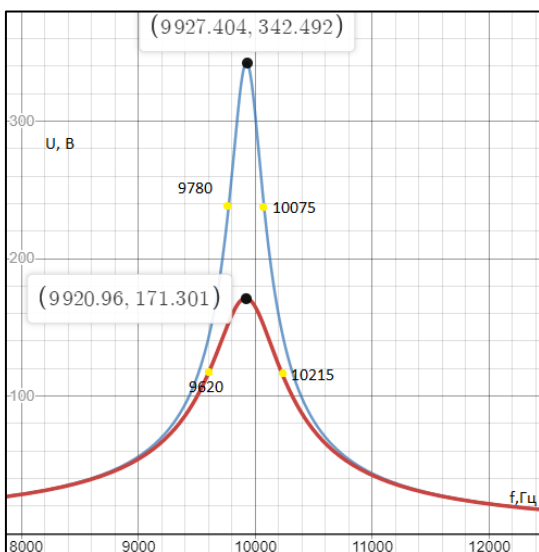


Рис.19. АЧХ, последовательный контур, 20кГц

Рис.18. АЧХ, последовательный контур, 10кГц

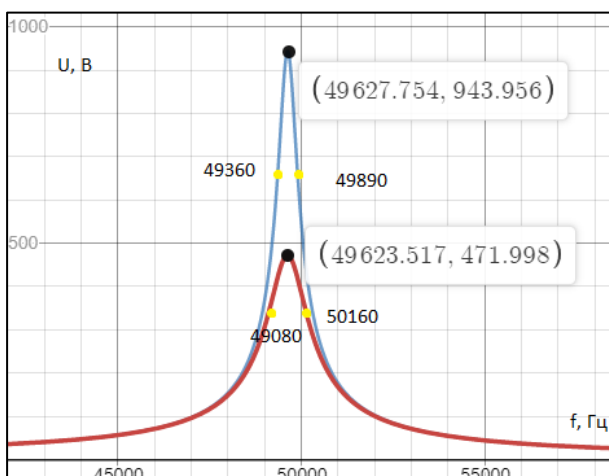


Рис.20. АЧХ, последовательный контур, 50кГц

5. Вычисления

5.1 Параллельный контур

Вычислим добротности по АЧХ (рис.11-15) по формуле (4). Далее по формуле (2) просчитаем переменное сопротивление проводника катушки. Сравнив его с теоретическим, можно по формуле (3) оценить толщину скин-слоя. Тем самым измерить величину скин-эффекта.

| f, Гц | Q при r | Q при r/2 | R exper. | δ , см |
|--------|---------|-----------|----------|---------------|
| 1000 | 2,3 | 5,9 | 0,00833 | 0,0445 |
| 10000 | 22,1 | 55,9 | 0,00861 | 0,043 |
| 20000 | 35,7 | 84,8 | 0,0102 | 0,0364 |
| 50000 | 29,6 | 46,3 | 0,0191 | 0,0194 |
| 100000 | 17,1 | 20,6 | 0,031264 | 0,012 |

Таблица 2. Результаты измерений на параллельном контуре

5.2 Последовательный контур

Теперь сделаем те же вычисления для идеального последовательного контура по АЧХ (рис.16-18).

| f, Гц | Q при r | Q при r/2 | R exper. | δ , см |
|-------|---------|-----------|----------|---------------|
| 10000 | 16,7 | 33,65 | 0,0095 | 0,039 |
| 20000 | 27,4 | 56 | 0,0117 | 0,0317 |
| 50000 | 46 | 93,64 | 0,01736 | 0,0213 |

Таблица 3. Результаты на последовательном контуре

6. Заключение

В работе рассмотрено несколько методов измерения скин-эффекта. Метод измерения скин-эффекта в цилиндрическом экране основан на методе экранирования поля, вытеснением его из внутренней области экрана. Предложен метод измерения скин-эффекта непосредственно в проводнике на основе резонансного метода, который заключается в изменении омического сопротивления провода с частотой переменного тока. Возможности использования данного метода проанализированы в данной работе. На основании результатов можно сделать вывод, что измерение скин-эффекта лучше всего проводить на параллельном контуре при достаточно высоких частотах ($>1-2$ кГц), на последовательном контуре измерения маловероятны. Полученные результаты хорошо согласуются с теорией.

7. Используемая литература

- 1) <https://electric-220.ru>
- 2) <https://elmag.nsu.ru/doku.php?id=si-sgs>
- 3) <http://phys.nsu.ru/electricity/Labworks.html>
- 4) Ландау Лифшиц 2003 Теория поля том 2
- 5) Сборник задач по электродинамике. В.В. Батыгин И.Н. Топтыгин