

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

Физический факультет
Кафедра общей физики
Селиванов Павел Дмитриевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Моделирование системы передачи мощности для устройств
расположенных под высоким потенциалом**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19302

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. В.Б. Рева

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы являлось изучение и применение на практике методов, используемых в высоковольтной электротехнике для передачи мощности. Для этой цели был произведен обзор устройств для передачи мощности на высоковольтную колонну установок электронного охлаждения, предложен и теоретически обоснован метод улучшения параметров трансформатора с использованием компенсирующих конденсаторов. Предложенный метод был протестирован на модельном высокочастотном разделительном трансформаторе с зазором. Для получившейся системы была построена амплитудно-частотная характеристика и зависимость мощности от величины нагрузки. Полученные результаты могут быть использованы в высоковольтных устройствах.

Ключевые слова: высокочастотный трансформатор, разделительный трансформатор, трансформатор с зазором, трансформатор с разъемом, индуктивность рассеяния, амплитудно-частотная характеристика, компенсирующие конденсаторы, резонанс в электрической цепи.

Оглавление

Аннотация.....	2
1. Введение.....	4
2. Теория.....	4
2.1 Принцип работы трансформатора [5].....	4
2.1.1 Модель.....	5
2.1.2 Приведенный трансформатор.....	6
2.1.3 Схема замещения трансформатора.....	6
2.2 Обзор типов используемых трансформаторов [4].....	6
2.2.1 Обычные трансформаторы.....	7
2.2.2 Трансформаторы с большим зазором [6].....	7
2.2.3 Трансформаторы без сердечника [4].....	8
2.3 Методы выравнивания передаточной функции.....	8
3 Описание эксперимента.....	12
3.1 Экспериментальная установка.....	12
3.2 Ход эксперимента.....	13
4 Обработка данных.....	14
4.1 Холостой ход.....	15
4.2 С компенсирующими емкостями.....	17
4.3 С нагрузкой.....	18
4.4 Параметры трансформатора с компенсирующими емкостями.....	19
5 Вывод.....	22
Литература.....	23

1. Введение

В современных экспериментальных установках часто возникает потребность в передаче напряжения на устройства, расположенные под потенциалом от нескольких Киловольт до нескольких Мегавольт [1]. Эта задача качественно отличается от передачи напряжения в большинстве проводимых нами лабораторных работах, где напряжения не превышают нескольких десятков вольт. Наибольшей проблемой в этом случае является обеспечение высоковольтной изоляции на требуемое напряжение. Следовательно надо конструировать системы передачи так, чтобы максимально уменьшить вероятность пробоев, а сами приборы должны быть устойчивы к ним. В данной работе будут рассмотрены стандартные методы конструирования систем передачи.

Существует много способов передачи напряжения на устройства под высоким потенциалом. Рассмотрим некоторые из них, применимые к установкам электронного охлаждения. Среди них есть механические, например, в установке электронного охлаждения в Fermilab с напряжением высоковольтного терминала 4.3 MV, для передачи мощности использовался вращающийся диэлектрический вал [2]. На установке “Ускорительный масс-спектрометр” ИЯФ СО РАН для питания элементов высоковольтного терминала, находящихся под потенциалом 1MV, используют механическую энергию сжатого газа [3]. Но такие случаи сравнительно редки, обычно применяют электротехнические методы, а именно разнообразные трансформаторы [4]. В данной работе автор сконцентрировался именно на них.

Цели данной работы можно сформулировать как:

- описание принципа работы трансформатора
- обзор используемых электротехнических методов передачи мощности
- изучение методов улучшения параметров передачи мощности в случае дополнительных требований, связанных с увеличением высоковольтной прочности системы
- применение полученных результатов на модельном трансформаторе. В качестве модели был выбран высокочастотный разделительный трансформатор с разъемом.

2. Теория

2.1 Принцип работы трансформатора [5]

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока. Далее в этом разделе будем рассматривать простейший трансформатор, состоящий из магнитопровода и двух обмоток.

2.1.1 Модель

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток j , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток проходит через обе обмотки (первичную и вторичную) и индуцирует в них ЭДС.

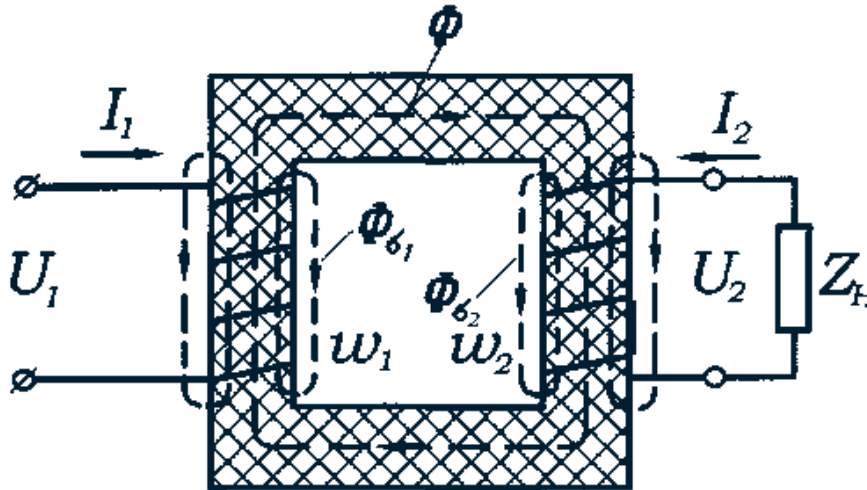


Рисунок 1: Магнитные потоки в трансформаторе

Предположим что магнитный поток — синусоидальная функция от времени $\dot{\Phi} = \Phi_m e^{j\omega t}$, тогда ЭДС обмоток равно:

$$\dot{\epsilon}_1 = -w_1 \left(\frac{d\dot{\Phi}}{dt} \right) = -j\omega w_1 \Phi_m e^{j\omega t} = -jE_1 e^{j\omega t}, \text{ где } E_1 = \omega w_1 \Phi_m \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_2 = -w_2 \left(\frac{d\dot{\Phi}}{dt} \right) = -j\omega w_2 \Phi_m e^{j\omega t} = -jE_2 e^{j\omega t}, \text{ где } E_2 = \omega w_2 \Phi_m \quad (2)$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего называют коэффициентом трансформации $k = E_1/E_2 = w_1/w_2$

Токи в обмотках трансформатора I_1, I_2 помимо основного магнитного потока Φ создают магнитные потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ (Рисунок 1). Каждый из этих потоков сцеплен с витками лишь собственной обмотки и индуцирует в ней ЭДС рассеяния:

$$\dot{\epsilon}_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \left(\frac{d\dot{I}_1}{dt} \right) = -j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1 \quad \dot{\epsilon}_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \left(\frac{d\dot{I}_2}{dt} \right) = -j\omega L_{\sigma 2} \dot{I}_2 \quad (3)$$

Так как магнитные потоки рассеяния замыкаются главным образом в немагнитной среде, магнитная проницаемость которой постоянна, то индуктивности $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ можно считать постоянными.

По второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_1 = -\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{\epsilon}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + j\omega L_{\sigma 1}) = -\dot{\epsilon}_1 + \dot{I}_1 Z_1, \text{ где } Z_1 = r_1 + j\omega L_{\sigma 1} \quad (4)$$

$$0 = -\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_{\sigma 2} + \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_H \Rightarrow \dot{U}_2 = \dot{\epsilon}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + j\omega L_{\sigma 2}) = \dot{\epsilon}_2 - \dot{I}_2 Z_2, \text{ где } Z_2 = r_2 + j\omega L_{\sigma 2} \quad (5)$$

где r_1 и r_2 — активное сопротивление катушек.

2.1.2 Приведенный трансформатор

Часто для анализа схемы удобно привести параметры трансформатора к одинаковому числу витков, обычно к числу витков первой обмотки. Тогда вместо реального трансформатора с коэффициентом трансформации $k = w_1/w_2$ получают эквивалентный трансформатор с коэффициентом трансформации $k' = w_1/w'_2 = 1$. Такой трансформатор называют приведенным.

$$\Phi = E_2 / \omega w_2 = E'_2 / \omega w_1 \Rightarrow E'_2 = E_2 k$$

Остальные параметры меняются из соображений сохранения мощности как

$$I'_2 = I_2 / k, \quad U'_2 = U_2 k, \quad r'_2 = r_2 k^2, \quad L'_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} k^2, \quad Z'_2 = Z_2 k^2, \quad Z_H = Z_H k^2, \quad \eta' = \eta$$

2.1.3 Схема замещения трансформатора

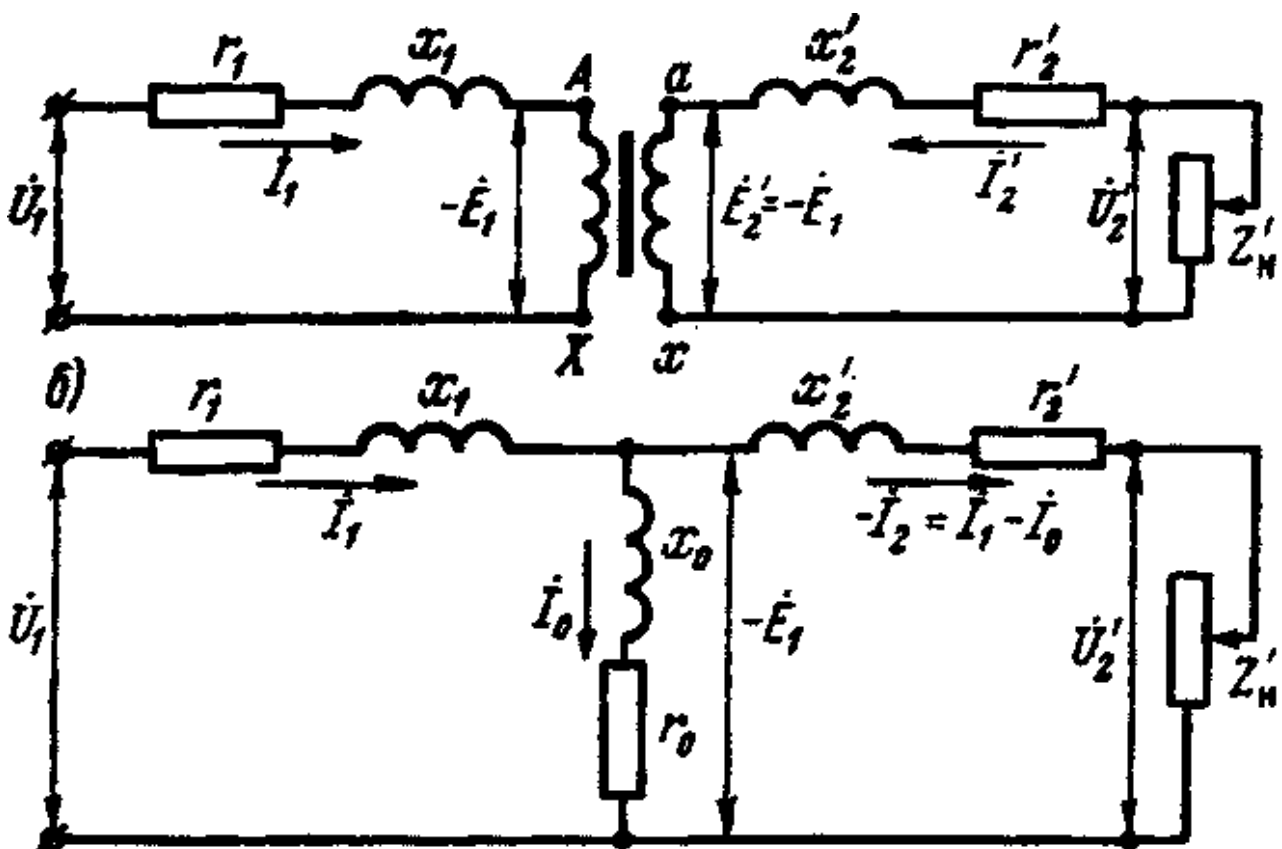


Рисунок 2: Эквивалентная схема приведенного трансформатора

После приведения легко перейти к эквивалентной схеме. Так как $k' = 1$, то $E'_2 = E_1$, следовательно точки А и а, а также точки Х и х на приведенном трансформаторе имеют одинаковые потенциалы, что позволяет электрически соединить указанные точки, получив Т-образную схему замещения приведенного трансформатора (Рисунок 2).

2.2 Обзор типов используемых трансформаторов [4]

Чаще всего используются трансформаторы следующих типов

- 1) обычные электротехнические трансформаторы с усиленной изоляцией между обмотками, расположенные на едином магнитопроводе

- 2) трансформаторы с большим зазором между обмотками, когда часть пути магнитный поток проходит вне магнитопровода по изолирующей среде
- 3) Трансформаторы без сердечника

2.2.1 Обычные трансформаторы

Главным преимуществом обычных трансформаторов является простота создания. Главным же недостатком — возможность пробоя изоляции проводов на магнитопровод. Так как магнитопровод цельный, то пробоем эквивалентен замыканию схемы, что недопустимо.

2.2.2 Трансформаторы с большим зазором [6]

Существует две основных компоновки:

- Вторичная обмотка расположена внутри первичной, магнитопровод расположен внутри вторичной обмотки и может быть секционированным, занимая почти все пространство внутри вторичной обмотки. Но может быть и сплошным, тогда он отделен от обмотки высоковольтным зазором.
- Первичная обмотка и магнитопровод расположены внутри вторичной обмотки и отделены от нее газовым зазором.

Эти варианты эквивалентны между собой по нагрузочным характеристикам, габаритной мощности и неравномерности слоевого напряжения. Преимуществом их перед обычными трансформаторами является улучшенная изоляция, а перед трансформаторами без сердечника — большая равномерность распределения напряжения по слоям катушки.

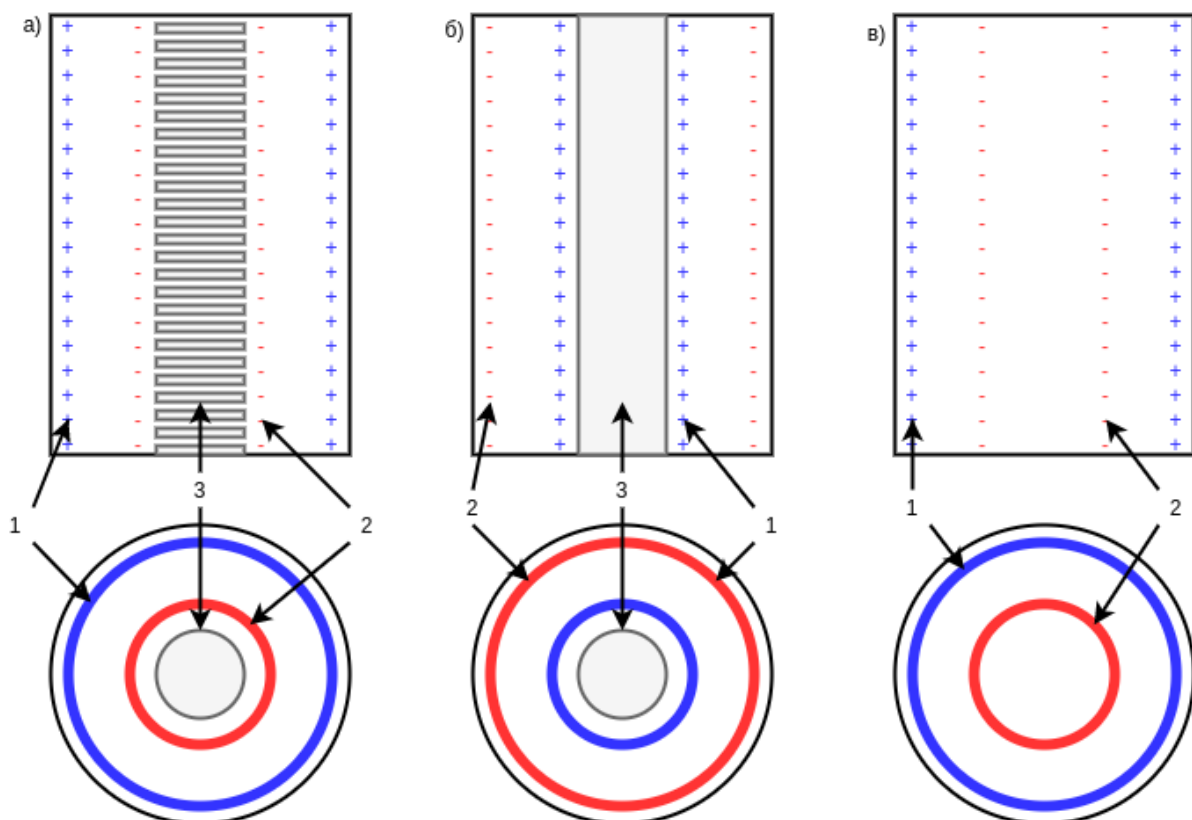


Рисунок 3: Принципиальные схемы трансформатора с зазором. а), б) - с сердечником; в) - без сердечника. 1 - первичная обмотка, 2 - вторичная обмотка, 3 - сердечник

2.2.3 Трансформаторы без сердечника [4]

При одинаковом количестве витков в обмотках трансформатор без сердечника обладает лучшей нагрузочной способностью, чем трансформаторы с большим зазором [6]. Но, как уже было сказано, трансформатор без сердечника имеет и большую неравномерность распределения напряжения по слоям катушки. Для компенсации этого вторичную обмотку разбивают на независимые обмотки, расположенные внутри одной первичной обмотки. Каждая вторичная обмотка входит в состав секции, включающей конденсатор, или несколько конденсаторов, для компенсации индуктивности рассеяния, и выпрямитель. Такая конструкция делает сложным разработку, сборку и обслуживание трансформатора.

2.3 Методы выравнивания передаточной функции

В последних двух типах трансформаторов с увеличением зазоров растут индуктивности рассеяния. При больших частотах уменьшение напряжения между первичной и вторичной обмотками становится существенным, и следовательно основной задачей становится их выравнивание.

Одним из способов является добавление нужных емкостей в начало и конец схемы, для достижения последовательного и параллельного резонанса.

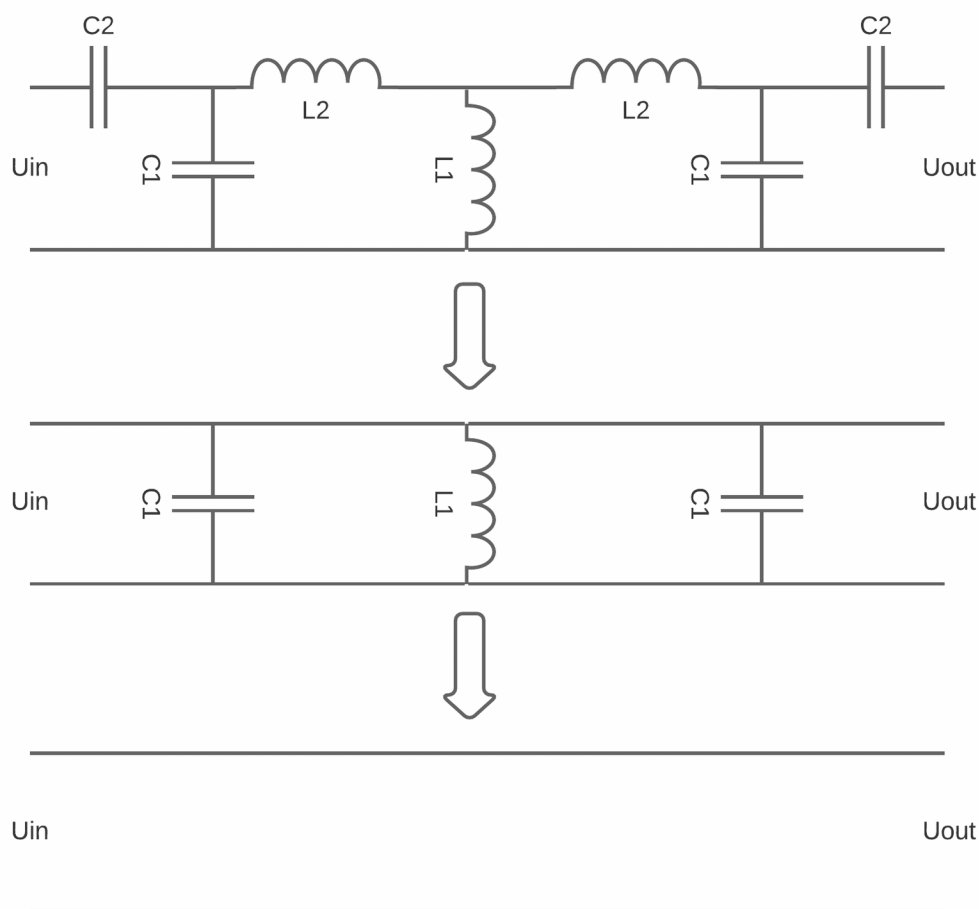


Рисунок 4: Метод упрощения схемы

Для начала будут получены грубые результаты: 1) исключим индуктивность L_2 , добившись последовательного резонанса; 2) добиваемся параллельного резонанса, исключая L_1 .

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{2L_2 * C_2 / 2}} = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}} \Rightarrow C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_1 * 2C_1}} \Rightarrow C_1 = \frac{1}{2\omega_0^2 L_1}$$

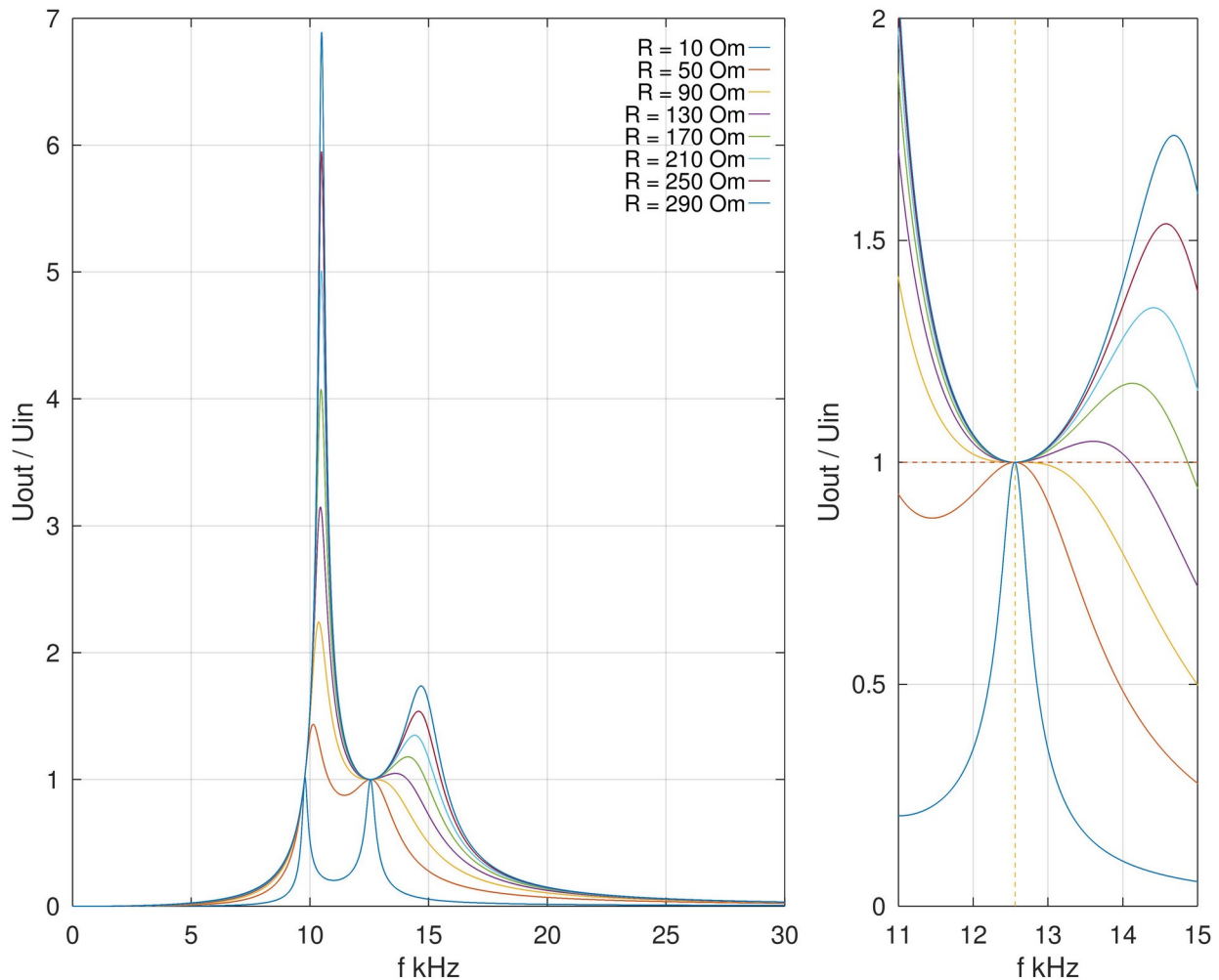


Рисунок 5: Моделирование АЧХ трансформатора с компенсирующими емкостями. (Вар 1)

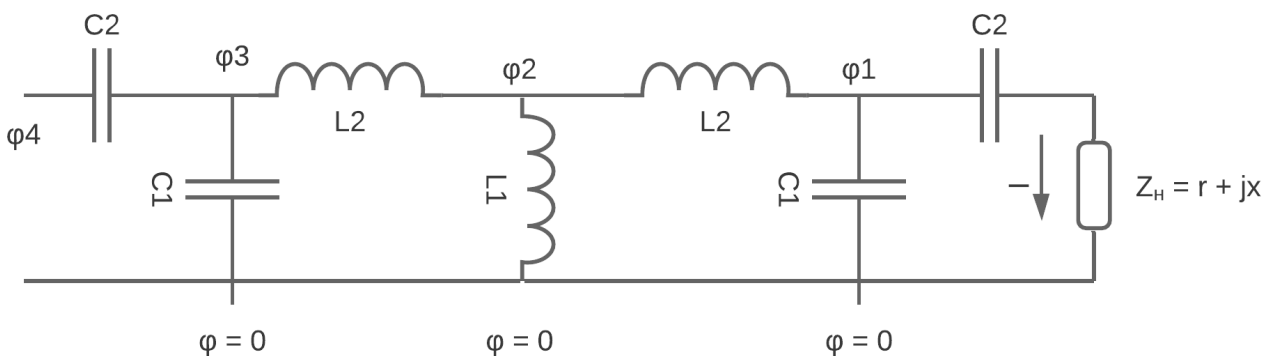


Рисунок 6: К методу узловых потенциалов

Моделируя результаты для конкретного трансформатора для резонансной частоты 20 кГц было замечено, что существует частота, в которой влияние генератора исчезает, но она отличается от планируемой и составляет приблизительно 12.6 кГц. Попробуем с помощью метода узловых потенциалов найти емкости конденсаторов, считая известным их отношение $C_1/C_2 = L_2/2L_1$. Предположим, что трансформатор нагружен внешним сопротивлением Z_n , имеющем активную r и реактивную x компоненты.

$$\phi_1 = I \left(Z_n + \frac{1}{j\omega C_2} \right) = I \left(r + j \left(x - \frac{1}{\omega C_2} \right) \right) = I \left(r + j \left(x - \frac{L_2}{2\omega L_1 C_1} \right) \right)$$

$$\frac{\phi_2 - \phi_1}{j\omega L_2} = I + \frac{\phi_1 - \phi}{1/j\omega C_1} \Rightarrow \phi_2 - \phi_1 = j\omega L_2 I - \phi_1 \omega^2 L_2 C_1$$

$$\frac{\phi_3 - \phi_2}{j\omega L_2} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{j\omega L_2} + \frac{\phi_2 - \phi}{j\omega L_1} \Rightarrow \phi_3 - \phi_2 = \phi_2 - \phi_1 + \phi_2 \left(\frac{L_2}{L_1} \right)$$

$$(\phi_4 - \phi_3) j\omega C_2 = \frac{\phi_3 - \phi_2}{j\omega L_2} + (\phi_3 - \phi) j\omega C_1 \Rightarrow \phi_4 - \phi_3 = \phi_3 \frac{C_1}{C_2} - \frac{\phi_3 - \phi_2}{\omega^2 L_2 C_2} = \phi_3 \frac{L_2}{2L_1} - \frac{\phi_3 - \phi_2}{2\omega^2 L_1 C_1}$$

$$\phi_4 = \phi_4 - \phi_3 + \phi_3 = \phi_3 \frac{L_2}{2L_1} - \frac{\phi_3 - \phi_2}{2\omega^2 L_1 C_1} + \phi_3 = (\phi_3 - \phi_2) \frac{2L_1 + L_2}{2L_1} - \frac{\phi_3 - \phi_2}{2\omega^2 L_1 C_1} + \phi_2 \frac{2L_1 + L_2}{2L_1} = (\phi_2 - \phi_1 + \phi_2 \left(\frac{L_2}{L_1} \right)) *$$

$$* \left[\frac{2L_1 + L_2}{2L_1} - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} \right] + \phi_2 \frac{2L_1 + L_2}{2L_1} = (\phi_2 - \phi_1) \left[\frac{2L_1 + L_2}{2L_1} - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} \right] + \phi_2 \left(\frac{2L_1 + L_2}{2L_1} \right) \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) - \frac{\phi_2}{2\omega^2 L_1 C_1} *$$

$$* \frac{L_2}{L_1} = (\phi_2 - \phi_1) \left[\left(\frac{2L_1 + L_2}{2L_1} \right) \left(2 + \frac{L_2}{L_1} \right) - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) \right] + \phi_1 \left[\left(\frac{2L_1 + L_2}{2L_1} \right) \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right) - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} * \frac{L_2}{L_1} \right] =$$

$$= (j\omega L_2 I - \phi_1 \omega^2 L_2 C_1) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right) \right] + \phi_1 \left[\left(\frac{2L_1 + L_2}{2L_1} \right) \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right) - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} * \frac{L_2}{L_1} \right] =$$

$$= j\omega L_2 I \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right) \right] + \phi_1 \left[\left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right) \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right) - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} * \frac{L_2}{L_1} - \frac{\omega^2 L_2 C_1}{2} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 \right] =$$

$$= I(r + jx) \left[\left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} * \frac{L_2}{L_1} - \frac{\omega^2 L_2 C_1}{2} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 \right] +$$

$$+ jI \left[\omega L_2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right) \right] - \frac{L_2}{2\omega L_1 C_1} \left[\left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} * \frac{L_2}{L_1} - \frac{\omega^2 L_2 C_1}{2} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 \right] \right]$$

Последнее выражение должно быть равно $I(r + jx)$ для любых r и x , следовательно:

$$\left[\left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} * \frac{L_2}{L_1} - \frac{\omega^2 L_2 C_1}{2} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 \right] = 1$$

$$\omega L_2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right) \right] - \frac{L_2}{2\omega L_1 C_1} \left[\left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} * \frac{L_2}{L_1} - \frac{\omega^2 L_2 C_1}{2} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 \right] =$$

$$= \omega L_2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 - \frac{1}{2\omega^2 L_1 C_1} \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right) \right] - \frac{L_2}{2\omega L_1 C_1} = 0$$

$$\omega L_2 \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right)^2 = \frac{L_2}{\omega L_1 C_1} + \frac{\omega L_2}{\omega^2 L_1 C_1} \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right) = \frac{L_2}{\omega L_1 C_1} \left(\frac{2L_1 + L_2}{L_1} \right) \Rightarrow \frac{2L_1 + L_2}{L_1} = \frac{1}{\omega^2 L_1 C_1}$$

Тогда $C_1 = \frac{1}{\omega^2 (2L_1 + L_2)}$, $C_2 = \frac{2L_1 C_1}{L_2} = \frac{2L_1}{\omega^2 L_2 (2L_1 + L_2)}$. Прямой подстановкой можно

убедиться, что первая скобка равна 1.

Моделирование генератора с такими емкостями также подтверждает правильность выкладок.

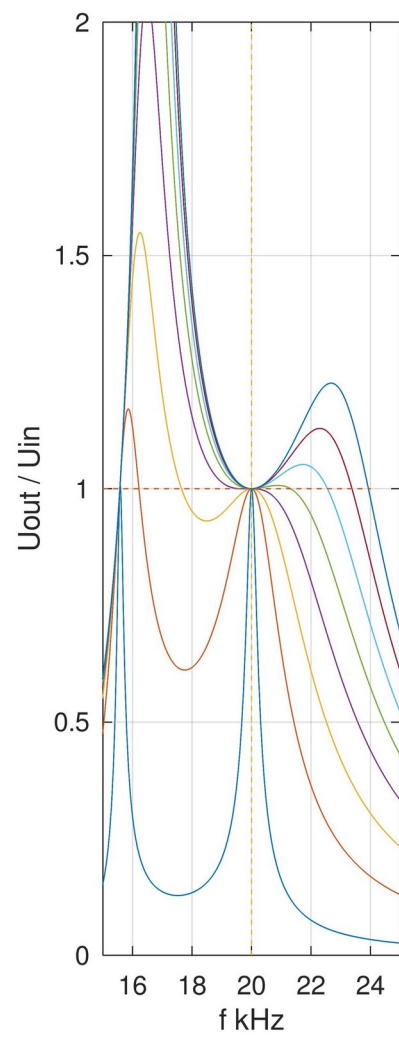
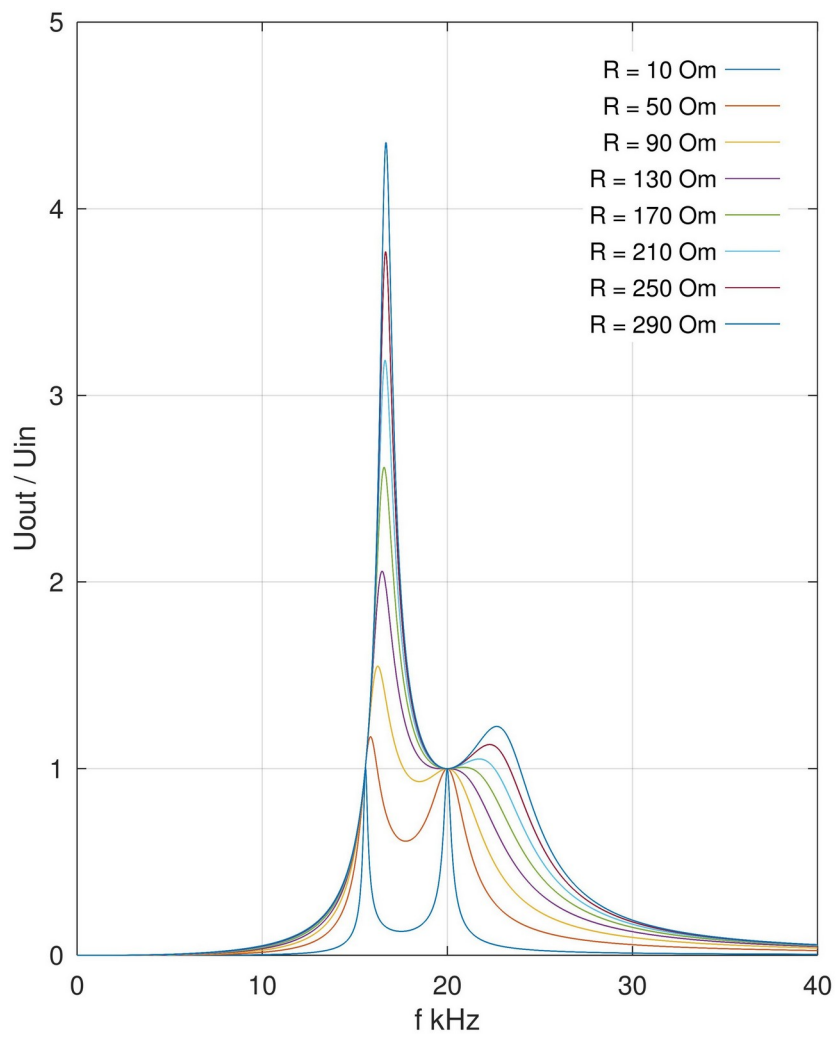


Рисунок 7: Моделирование АЧХ трансформатора (Вар 2)

3 Описание эксперимента

3.1 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из:

- модельного трансформатора
- генератора переменного тока
- осциллографа
- пластины диэлектрика, толщиной 1.1 и 6.3 мм
- набора сопротивлений
- набора емкостей

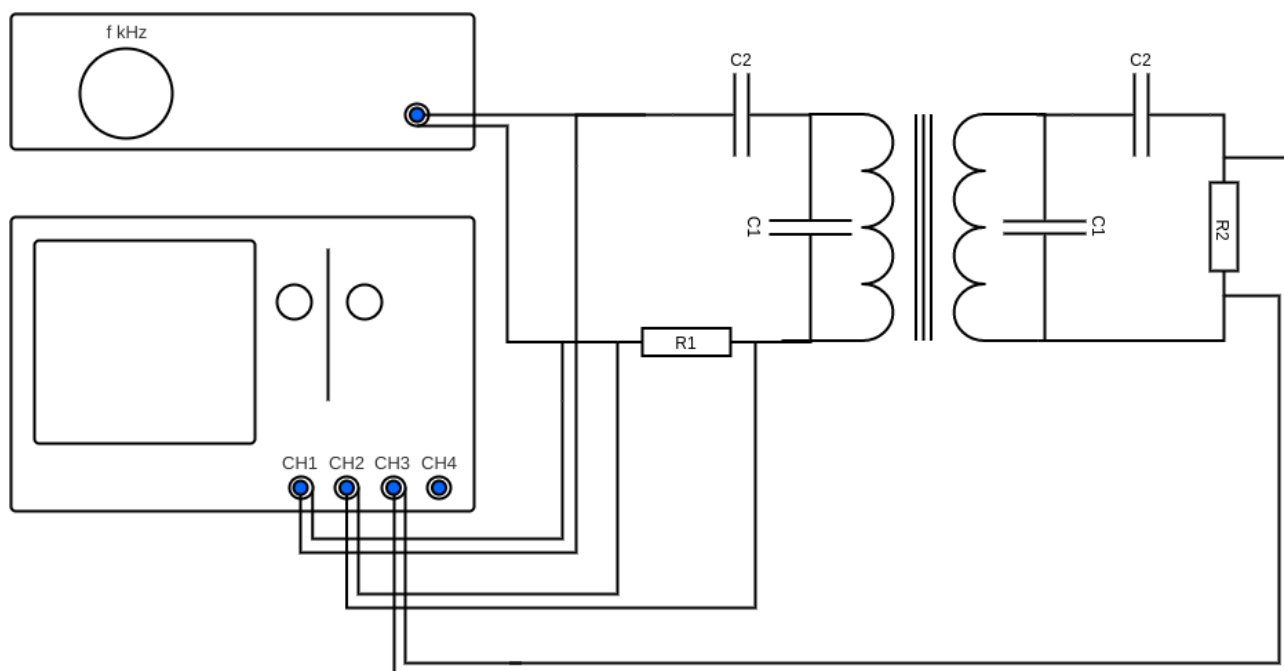


Рисунок 8: Схема экспериментальной установки

В качестве модельного был выбран высокочастотный разделительный трансформатор, т.е. две катушки по 50 витков, намотанные на две части сердечника. Из-за высоких частот в магнитопроводе могут возникать высокие токи Фуко, приводящие к сильному нагреву сердечника, что недопустимо. Использование сердечника из наборных пластин, как это делают для низкочастотных трансформаторов, поможет не значительно. Одним из материалов, обладающих очень низкими удельными потерями на вихревые токи, является аморфное железо [7]. Таким образом, сердечник представляет из себя звено цепи из аморфного железа, разрезанное по длинной стороне. При раздвигании обкладок увеличивается индуктивность рассеяния, следовательно можно проверить на практике приведенные выше выкладки.

Пластины используются в качестве изолятора между частями магнитопровода, а также позволяют поддерживать расстояние между ними с высокой точностью.

3.2 Ход эксперимента

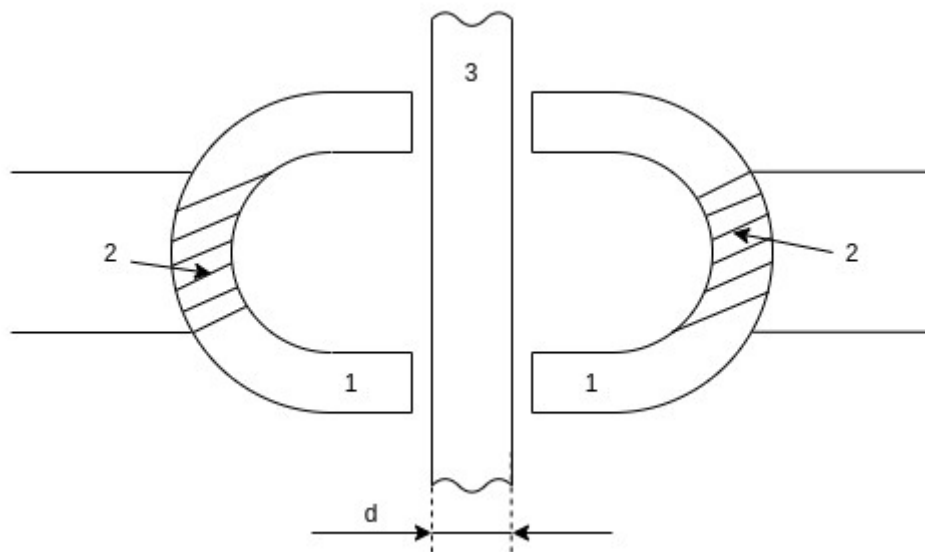


Рисунок 9: Принципиальная схема работы трансформатора. 1 - сердечник, 2 - первичная и вторичная обмотки, 3 - диэлектрическая пластина

Проведение эксперимента можно разделить на три этапа:

- 1) измерение параметров трансформатора без конденсаторов в режиме холостого хода;
- 2) измерение параметров трансформатора без конденсаторов с нагрузкой;
- 3) измерение параметров трансформатора с подобранными компенсирующими емкостями;

Первый этап служит для определения параметров трансформатора, а второй и третий — для проверки работоспособности модели.

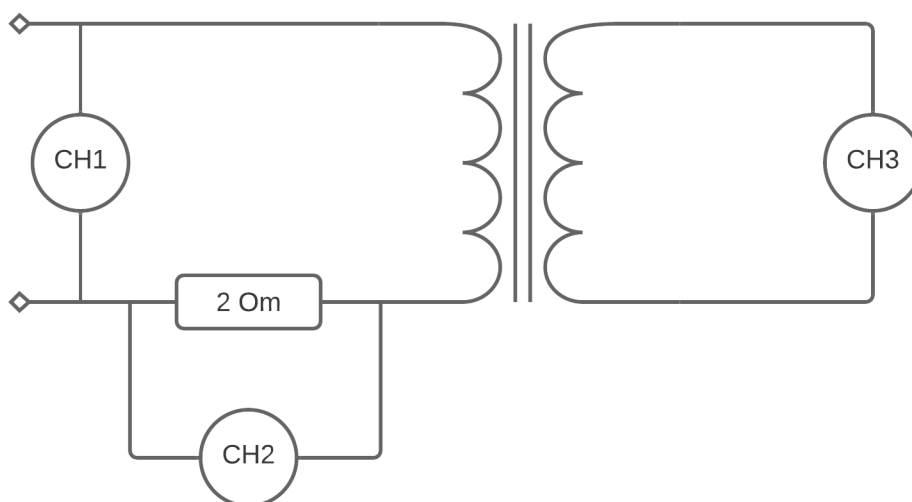


Рисунок 10: Схема для измерения параметров в режиме холостого хода

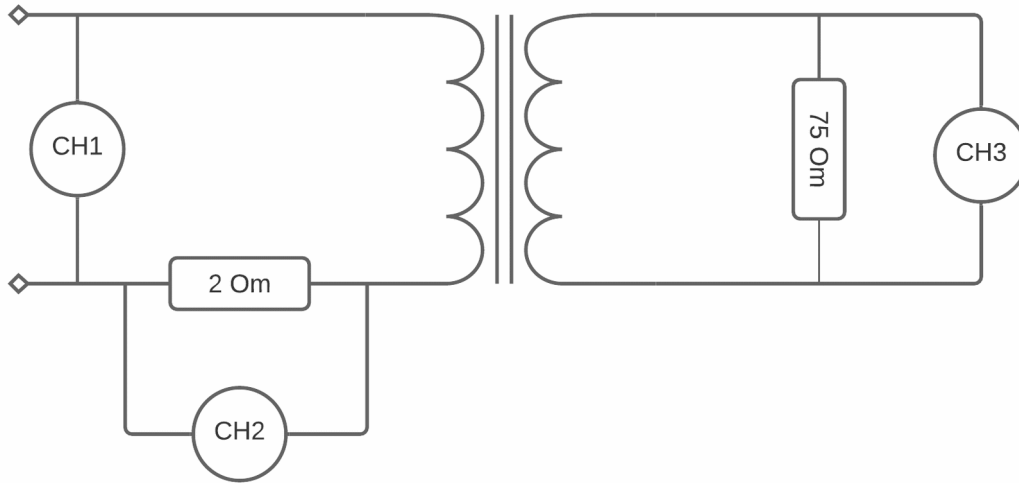


Рисунок 11: Схема для измерения параметров с нагрузкой

В пунктах 1 и 2 снимались АЧХ трансформатора для 4 расстояний между частями магнитопровода. В задаче компенсации наибольший интерес представляет пластина с наибольшей толщиной. Поэтому в 3 пункте снималось АЧХ для максимального расстояния 6.3 мм для нескольких R.

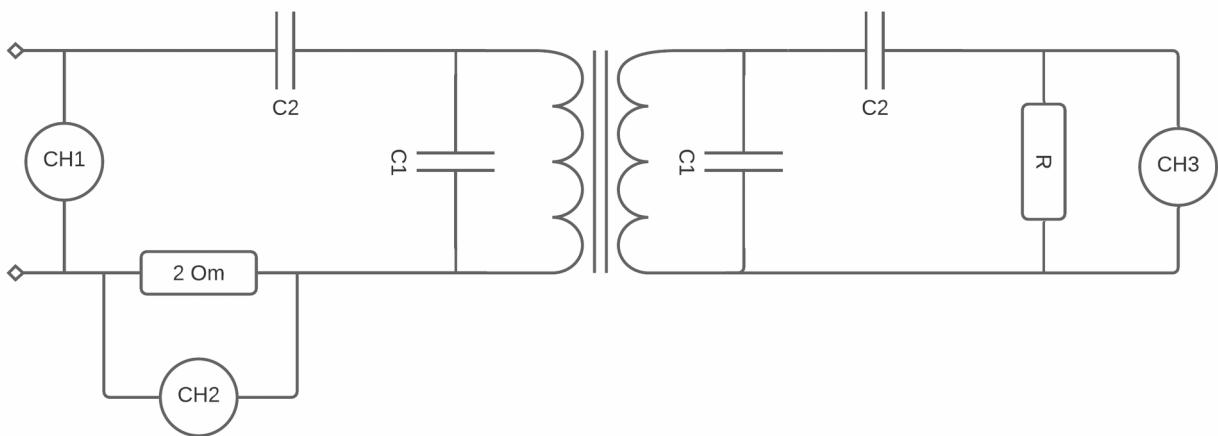


Рисунок 12: Схема измерения параметров трансформатора с компенсирующими емкостями

4 Обработка данных

Так как трансформатор разделительный, он автоматически является приведенным, следовательно без предварительных преобразований можно представить его в виде Т-схемы. Так как половины симметричны, то с хорошей точностью можно считать, что $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ равны L_2 . На рисунках 13, 16 и 19 изображены эквивалентные схемы эксперимента. В процессе эксперимента с помощью осциллографа измерялись входное напряжение (CH1), ток первичной обмотки (CH2) и выходное напряжение (CH3).

4.1 Холостой ход

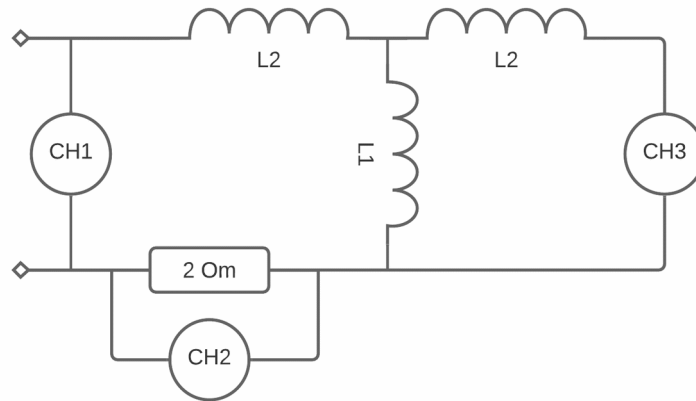


Рисунок 13: Эквивалентная T-схема трансформатора в режиме холостого хода

$$I = \frac{V_2}{2} = \frac{V_1}{\sqrt{4 + \omega^2(L_1 + L_2)^2}} \Rightarrow I\omega(L_1 + L_2) = \sqrt{V_1^2 - V_2^2} \Rightarrow L_1 + L_2 \text{ угол наклона прямой в осях } \langle I\omega, E = \sqrt{V_1^2 - V_2^2} \rangle$$

$$V_3 = I\omega L_1 \Rightarrow L_1 \text{ угол наклона прямой в осях } \langle I\omega, V_3 \rangle$$

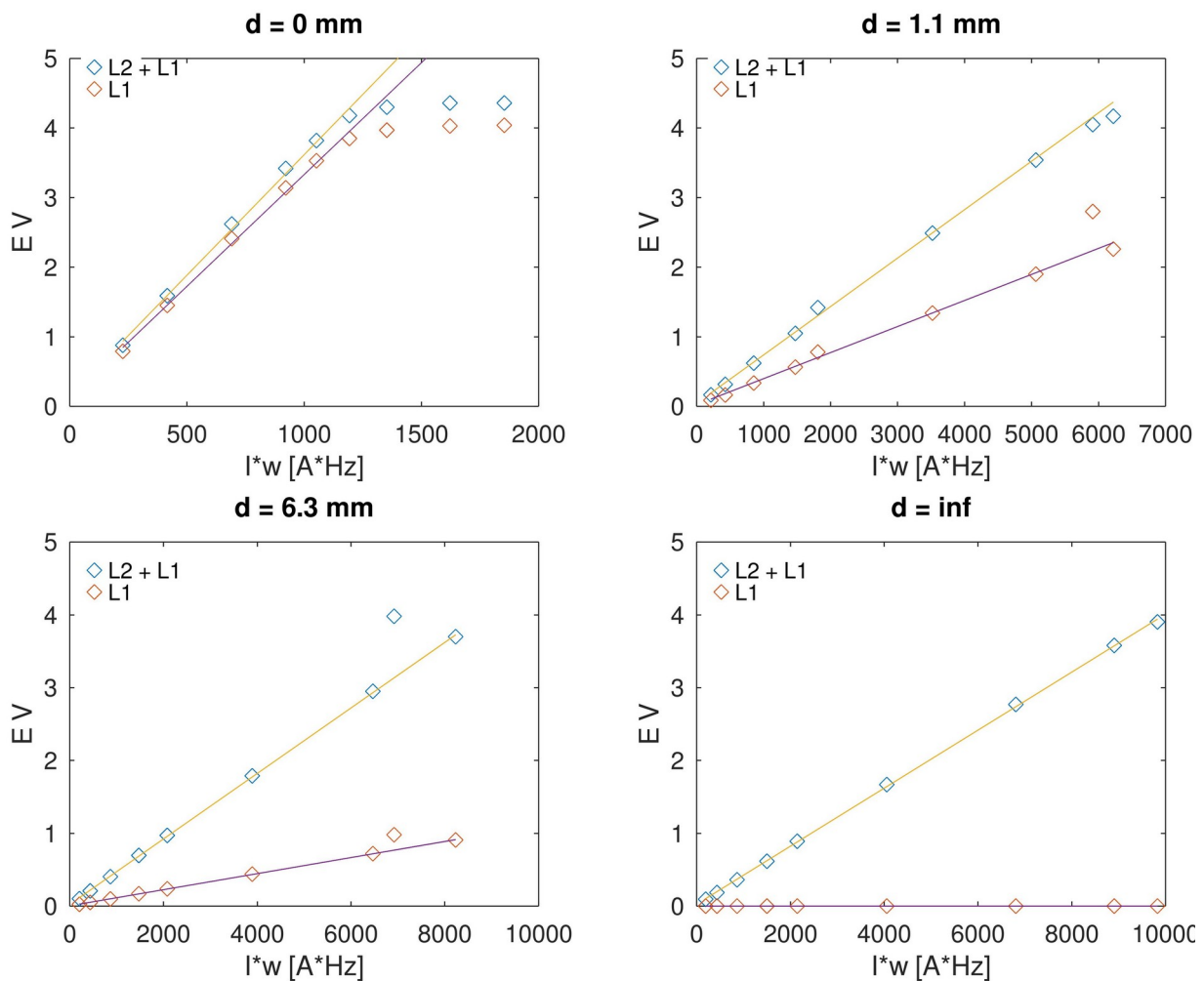


Рисунок 14: Экспериментальные данные в режиме холостого хода в осях $\langle I\omega, V \rangle$

При расстоянии $d = 0$ мм график выходит на плато, что связано с неидеальностью генератора

d мм	L_1 мГн	L_2 мГн
0	3,215	0,251
1.1	0,375	0,322
6.3	0,110	0,340
∞	0,000	0,398

Проверим правильность расчетов, определив I и V_3 через V_1 . И графика на рисунке 15 видно, что данные с хорошей точностью совпадают. Погрешности токов на низких частотах могут быть связаны с большой относительной погрешностью

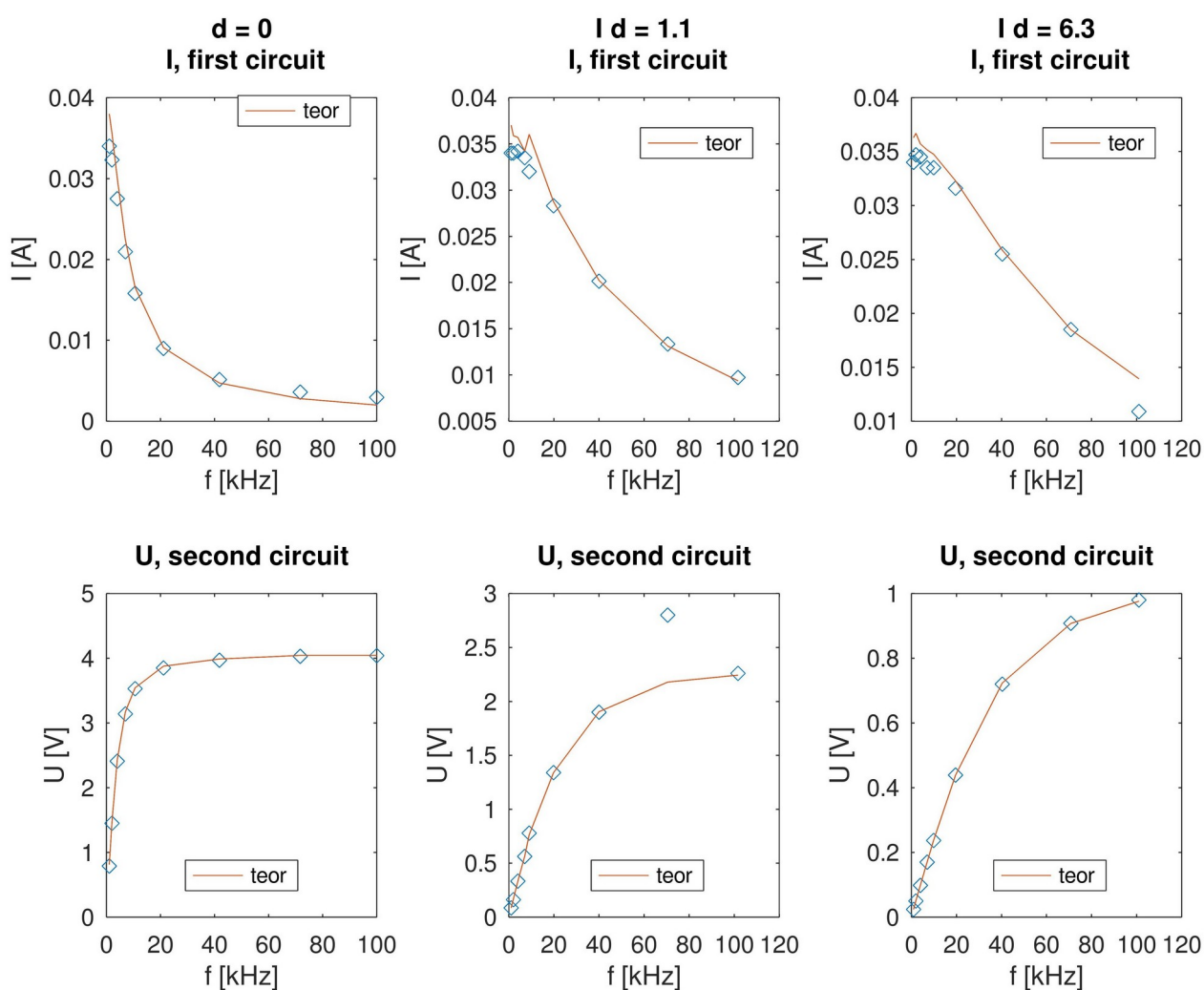


Рисунок 15: Графики силы тока в первой обмотке и напряжения во второй от частоты источника. Экспериментальные данные и данные, определенные из параметров трансформатора и входного напряжения (теоретические)

4.2 С компенсирующими емкостями

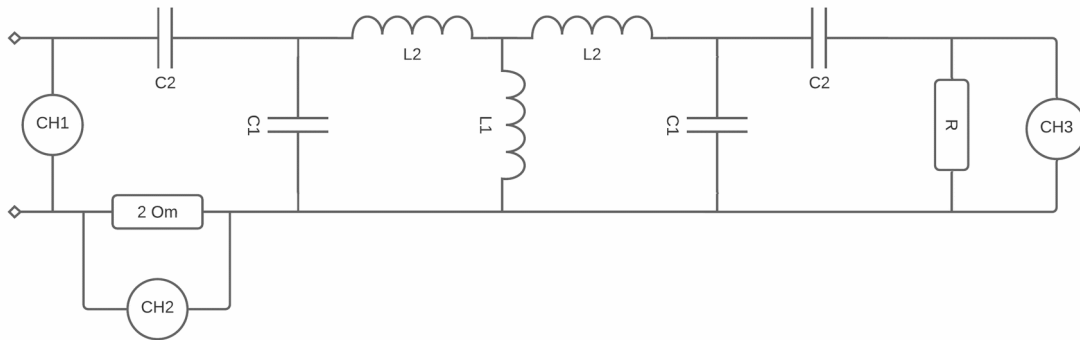


Рисунок 16: Эквивалентная схема трансформатора с компенсирующими емкостями

Найдем емкости конденсаторов для расстояния между частями магнитопровода равного 6.3 мм. Согласно модели, для резонансной частоты 20 кГц, емкости составляют:

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2(2L_1 + L_2)} = \frac{1}{4 \cdot 10^8 * 4 \pi^2 (2 * 0.11 + 0.34) * 10^{-3}} = 113 \text{ нФ}$$

$$C_2 = \frac{2L_1}{\omega_0^2 L_2 (2L_1 + L_2)} = \frac{2 * 0.11}{4 * 10^8 * 4 \pi^2 * 0.34 * (2 * 0.11 + 0.34) * 10^{-3}} = 73 \text{ нФ}$$

Из-за технических ограничений были взяты две другие пары емкостей

$$C_{11} = 100 \text{ нФ}, C_{21} = 100 \text{ нФ}; \quad C_{21} = 112 \text{ нФ}, C_{22} = 69 \text{ нФ}$$

Последняя пара емкостей была получена с помощью последовательного и параллельного соединения конденсаторов емкостями 100, 220 и 500 нФ.

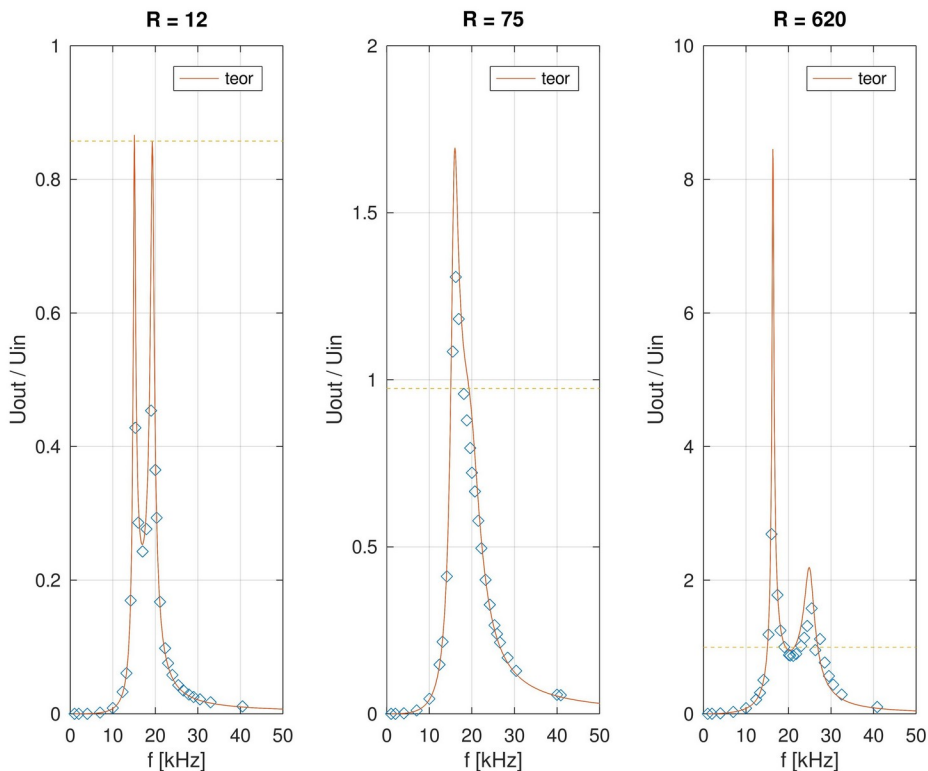


Рисунок 17: Эксперимент с $C_1 = C_2 = 100 \text{ нФ}$

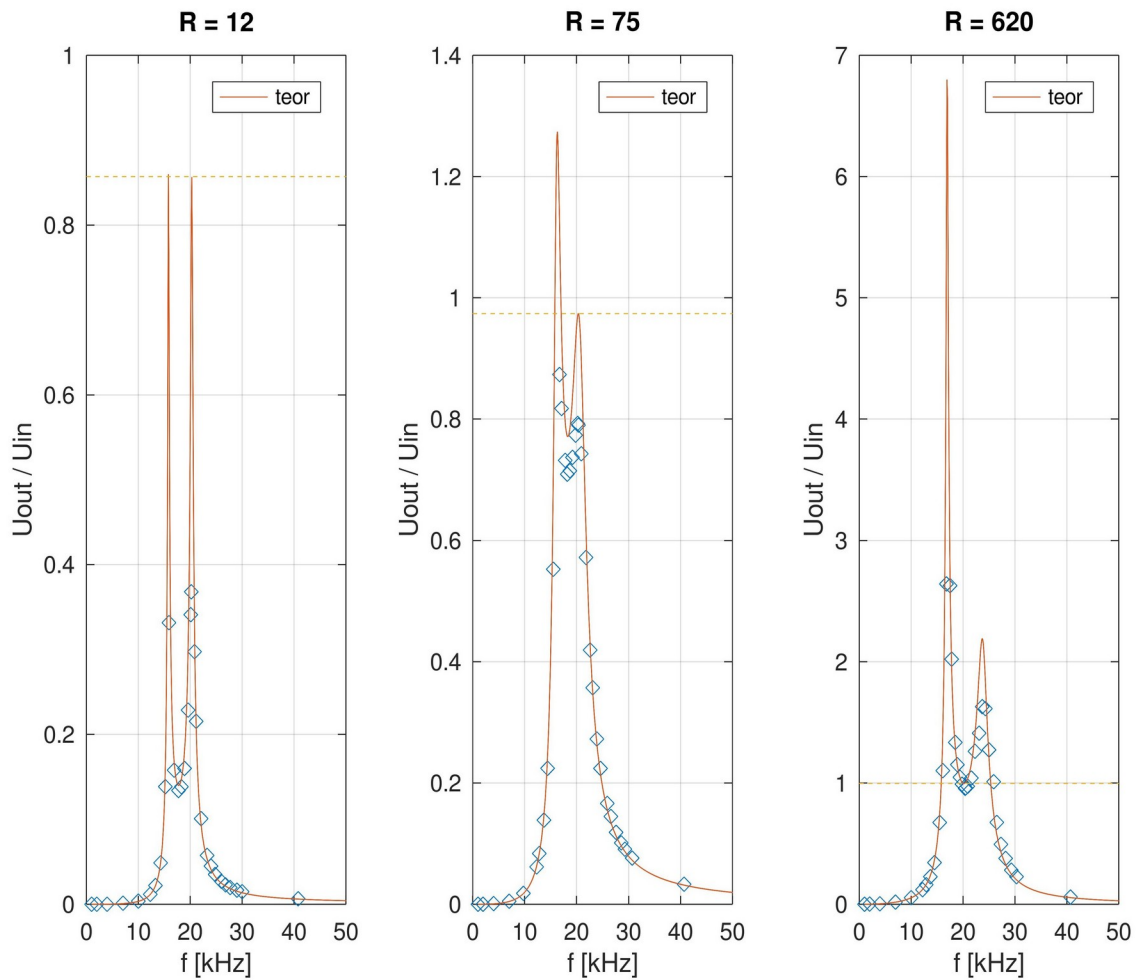


Рисунок 18: Эксперимент с $C_1 = 112 \text{ nF}$ $C_2 = 69 \text{ nF}$

4.3 С нагрузкой

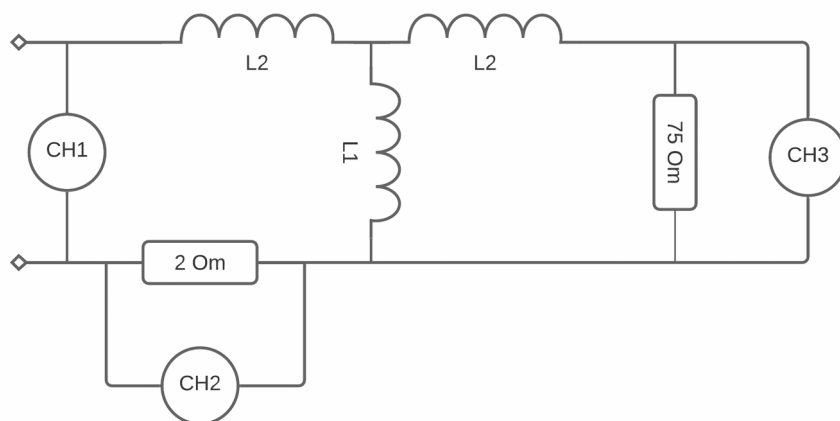


Рисунок 19: Эквивалентная схема трансформатора с нагрузкой

Измерим АЧХ трансформатора без добавочных емкостей, чтобы оценить эффективность предложенного метода. Из графика на рисунке 20 видно, что в окрестности выделенной частоты значения передаточной функции трансформатора резко возрастают, что экспериментально подтверждает работоспособность данного метода.

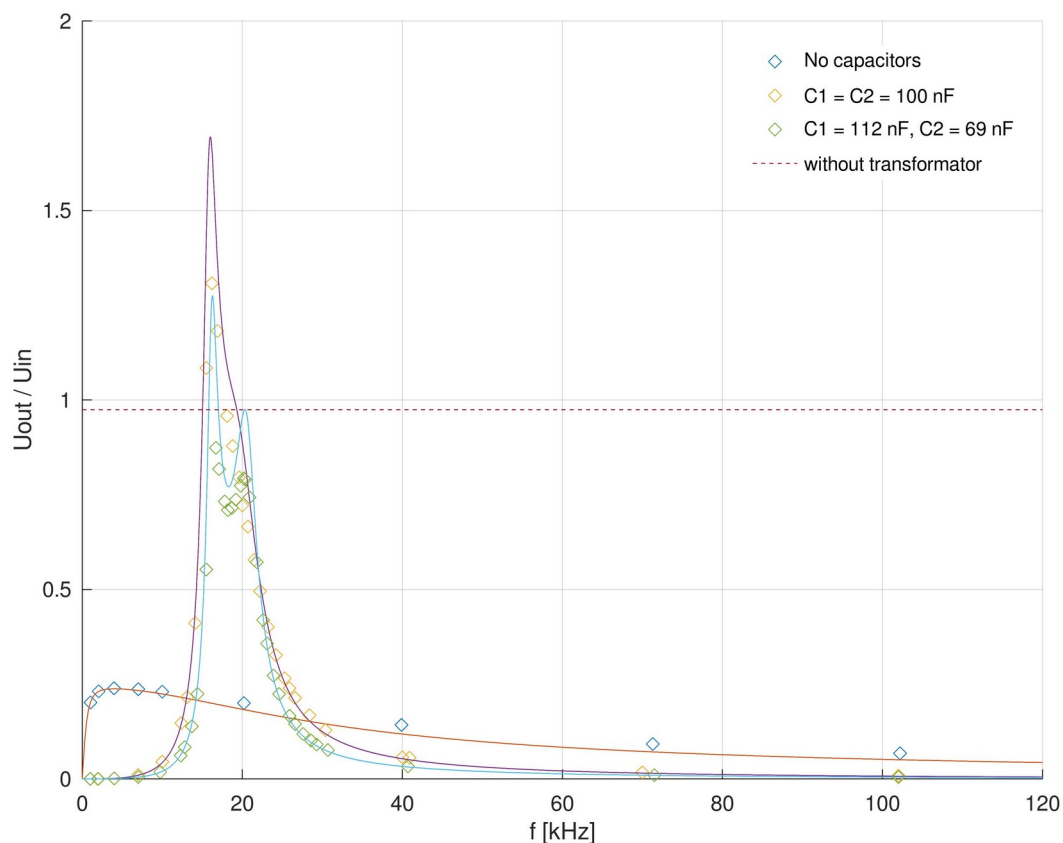


Рисунок 20: Сравнение АЧХ без конденсаторов и с ними

4.4 Параметры трансформатора с компенсирующими емкостями

Были исследованы зависимости коэффициента передачи $k = U_{out} / U_{in}$ и мощности системы от сопротивления нагрузки. Из-за неидеальности подбора емкостей расчеты проводились при нескольких частотах в окрестности 20 кГц.

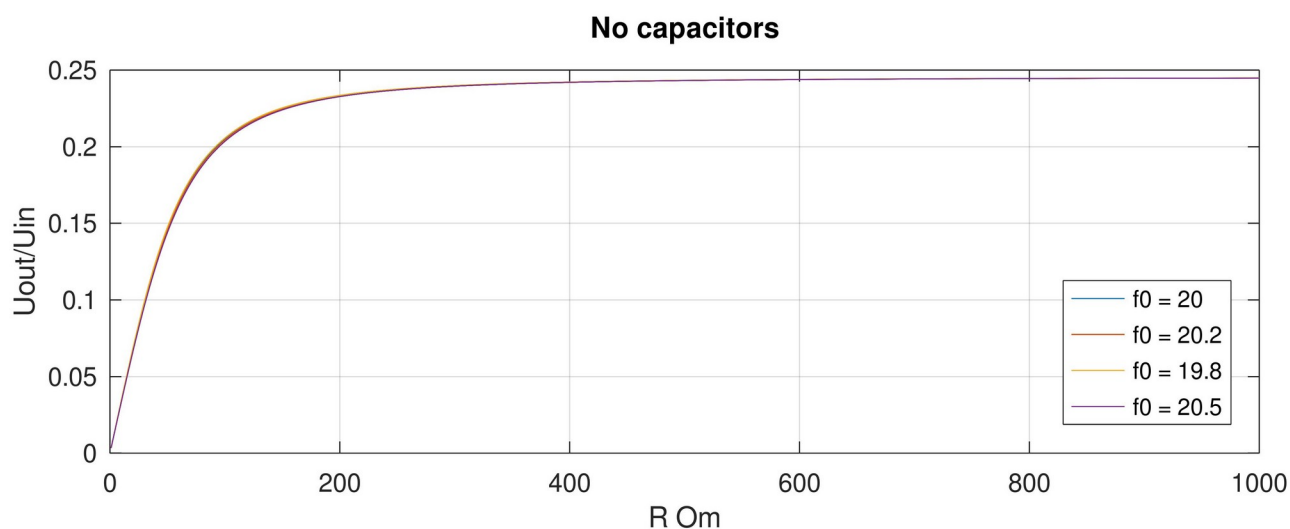


Рисунок 21: Коэффициент передачи от сопротивления нагрузки для трансформатора без конденсаторов

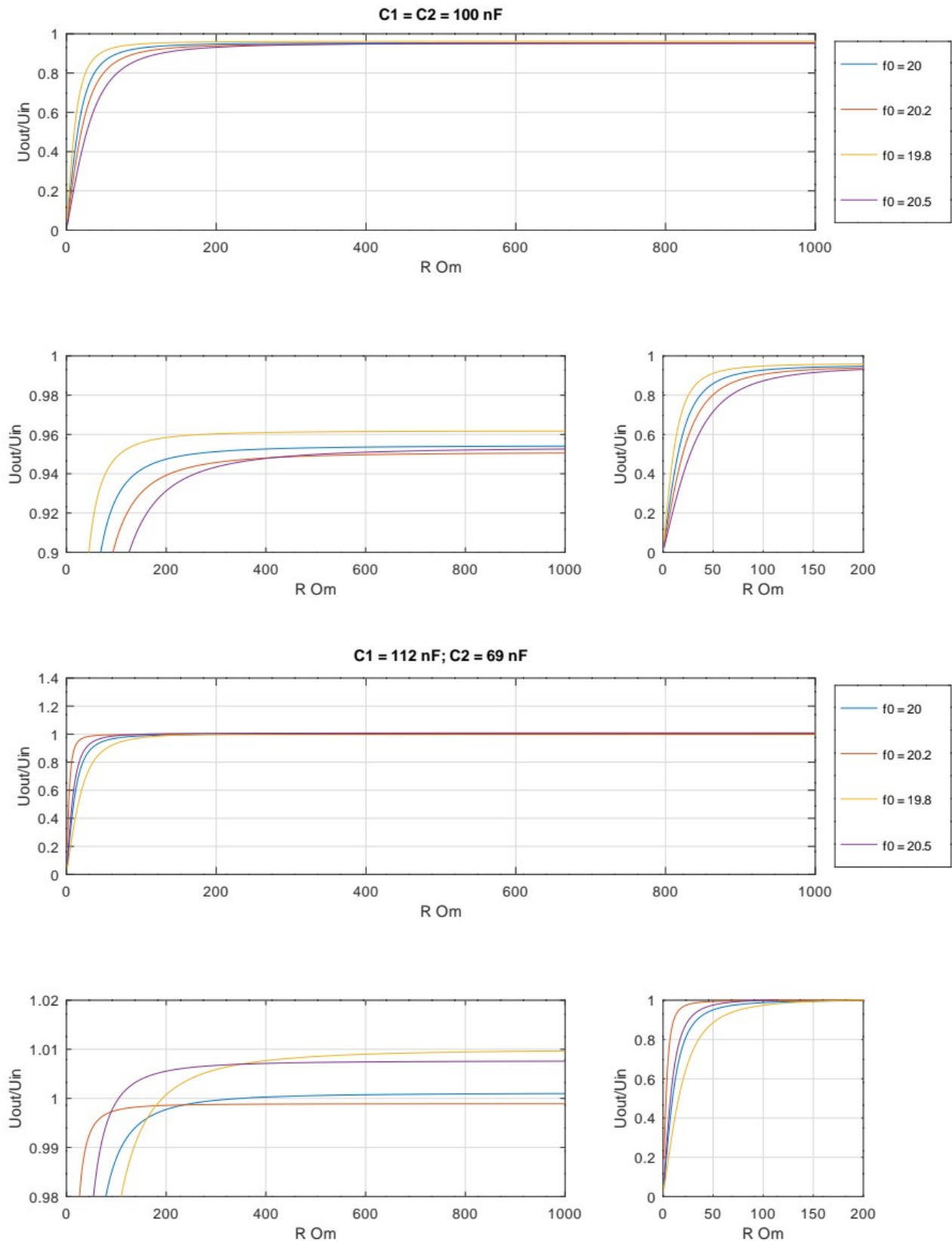


Рисунок 22: Коэффициент передачи от сопротивления нагрузки для трансформатора с емкостями

Ниже приведены графики активной и реактивной мощностей трансформатора отнесенных к квадрату входного напряжения, т. е. $W_{act} = \Re(U_i^2 / \bar{z}) / U_i^2 = \Re(z) / |z|^2$, $W_{react} = \Im(z) / |z|^2$, где z — комплексное сопротивление трансформатора с нагрузкой.

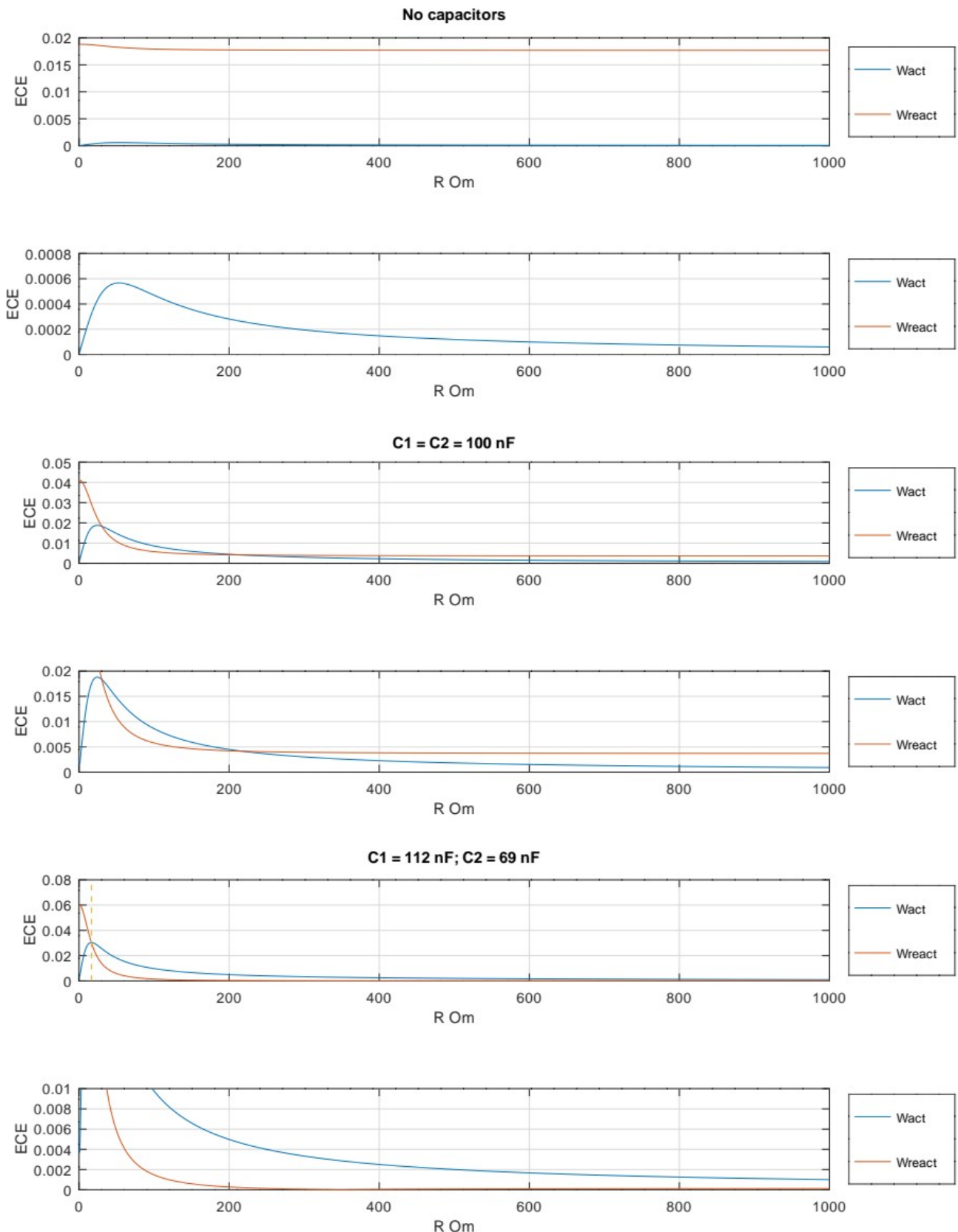


Рисунок 23: Мощность трансформатора с компенсирующими емкостями и без них

Как видно из графика мощности для случая с наиболее близкими к теории емкостями, начиная с некоего R нагрузки (16.5 Ом), активная мощность стабильно больше реактивной.

5 Вывод

В работе изучены принцип работы трансформатора и причины отличия передаточной функции от 1. Предложен и обоснован принцип выравнивания передаточной функции, который после был проверен на модельном трансформаторе. Экспериментальные данные хорошо описываются моделью приведенной в работе. В результате подбора компенсирующих емкостей было достигнуто увеличение коэффициента передачи с 0.21 до 0.82 для нагрузки 75 Ом и от 0.25 (теоретических) до 0.99 для 620 Ом.

Для системы, состоящей из трансформатора и компенсирующих конденсаторов, были смоделированы зависимости активной и реактивной мощности, передаточной функции от сопротивления нагрузки, которые являются важными показателями трансформатора.

Литература

- [1] *Валяев Ю.Д., Казарезов И.В., Кузнецов В.И., Останин В.П.* Малогабаритный высокочастотный разделительный трансформатор для питания устройств расположенных под высоким потенциалом. Препринт 89-160. ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1989. 25 с.
- [2] *Kazakevich G., Burov A., Boffo C.* Recycler Electron Cooling project: Mechanical vibrations in the Pelletron and their effect on the beam. Preprint FERMILAB-TM-2319-AD, 2005. DOI: 10.2172/15020252
- [3] *Брызгунов М.И., Гончаров А.Д., Панасюк В.М., Пархомчук В.В., Рева В.Б., Скоробогатов Д.Н.* Приборы и техника эксперимента. 2015.№2. С. 14-23.
- [4] *Денисов А.П., Пархомчук В.В., Рева В.Б., Путьмаков А.А., Li J., Mao L.J., Tang M.T., Zhao H., Ma X.M.* Журнал технической физики. 2018. Т. 88.№8. С. 1248-1258.
- [5] *Кислицын А.Л.* Трансформаторы: Учебное пособие по курсу «Электромеханика» .- Ульяновск: УлГТУ, 2001. - 76 с.
- [6] *Зайцев В.Н., Кузнецов С.А., Куксанов Н.К., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Черепков В.Г.* Высоковольтный источник питания мощного электронного ускорителя. Препринт 90-50. ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1990. 30 с.
- [7] *Габдрахманова А.А., Мирзаянов Р.Р., Вавилов В.Е.* В сборнике: Электротехнические комплексы и системы. Межвузовский научный сборник. 2014. С. 156-159.