

**РАСЧЕТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДЕМОСТРАЦИОННОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА**

Д.В. Ларионов

Научный руководитель: А.С. Юдин, н.с., к.т.н.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина 30

E-mail: mishika@tpu.ru

**Введение.**

Трансформатор Тесла производит разряды, по виду напоминающие молнии и представляющие собой незавершенный искровой лидерный разряд в воздухе. На кафедре Техники и Электрофизики Высших Напряжений института Физики Высших Технологий НИ ТПУ, создан полупроводниковый трансформатор Тесла, который предполагается использовать в качестве лабораторного стенда для изучения процессов в магнитно связанных резонансных колебательных контурах. На стадии расчета возникла проблема с выбором метода, позволяющего снизить материальные и временные затраты на изготовление. Обычно при расчете трансформатора Тесла исходят из параметров вторичной катушки или требуемой мощности трансформатора.

Описанный метод позволяет рассчитать параметры трансформатора, исходя из геометрических размеров высоковольтного терминала (тороида).

**Теория работы.**

Полупроводниковый и классический трансформаторы Тесла отличаются по схеме включения источника питания и виду переходного процесса и не имеют различий в конструкции колебательных контуров. Для расчета контуров воспользуемся схемой классического трансформатора Тесла.

Трансформатор Тесла представляет собой систему двух магнитно связанных резонансных колебательных  $RLC$  – контуров (Рис.1.).

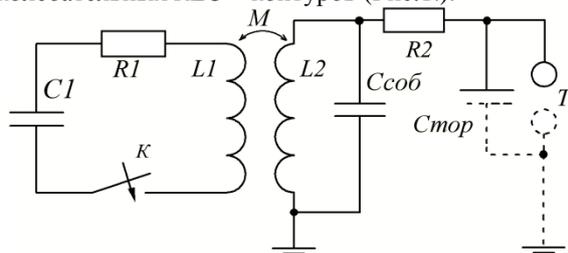


Рис.1. - Принципиальная схема классического трансформатора Тесла.  $C_1$ ,  $L_1$ ,  $R_1$  – емкость, индуктивность, активное сопротивление первичного контура;  $L_2$ ,  $R_2$  – индуктивность и активное сопротивление вторичного контура,  $C_{тор}$ ,  $C_{соб}$  – емкости тороида и собственной обмотки, соответственно.  $T$  – высоковольтный терминал (тороид).  $K$  – коммутатор,  $M$  – взаимная индуктивность контуров.

Ёмкость вторичного контура  $C_2$ , (2) состоит из емкости тороида относительно земли  $C_{тор}$ , собственной емкости вторичной обмотки  $C_{соб2}$ .

Когда на тороиде возникает разряд, во вторичном контуре появляется добавочная ёмкость  $C_{доб}$ . Она ощутима только в больших трансформаторах, у которых длина стримера больше метра, в нашем случае ей можно пренебречь [2].

В начальный момент времени ёмкость  $C_1$  заряжена до напряжения  $U_{c1}$ . После замыкания коммутатора  $K$  в первичном контуре  $L_1C_1$  возникают свободные колебания, которые за счёт магнитной связи передаются во вторичный контур. Энергия, содержащаяся в  $C_1$ , перекачивается в  $C_2$  и обратно до тех пор, пока не израсходуется на создание стримеров и рассеется в виде омических потерь, в сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$ .

Для передачи энергии между контурами с наименьшими потерями необходимо, чтобы собственные частоты контуров были равны [1] т.е.:

$$f_{рез} = f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1}} = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 \cdot C_2}} \quad (1)$$

Или

$$L_1 \cdot C_1 = L_2 \cdot C_2$$

Напряжение на емкости  $C_2$  достигает максимального значения  $U_{2max}$  при некоторых фиксированных значениях коэффициента связи  $k_c = 1; 0,6; 0,385; 0,28; 0,219$  и т.д. Чем выше коэффициент связи между обмотками, тем меньше периодов колебаний требуется, чтобы достичь максимума напряжения [1].

Существует теория, что вторичная обмотка является вибратором Герца. При этом длина проводника вторичной обмотки должна быть  $l_{n2} = n \cdot \lambda / 4$ , где  $n = 1, 3, 5, \dots$ ,  $\lambda$  – длина волны колебаний вторичного контура. Если обмотка соответствует данному условию (выр. 3 - 5), то максимум напряжения во время работы приходится непосредственно на незаземленный конец обмотки и тороид

**Метод расчета.**

В качестве исходных данных для расчета были приняты геометрические размеры имеющихся в свободной продаже материалов и частота резонанса  $f_{рез} = 160$  кГц. Обосновано это стремлением к уменьшению затрат на производство трансформатора.

Тороид: внешний диаметр  $D = 220$  мм, диаметр сечения  $d = 80$  мм. Диэлектрический сердечник вторичной катушки: диаметр  $d_2 = 50$  мм, длина намотки  $l_2 = 350$  мм.

Ёмкость тороида  $C_{тор}$  [пФ], (размеры в см):

$$C_{тор} = (1,2781 - \frac{D}{d}) \sqrt{2\pi \cdot 0,155 \cdot (D-d) \cdot d}$$

Собственная межвитковая ёмкость вторичной обмотки  $C_{cob2}$  [пФ]:

$$C_{cob2} = 0,29 \cdot l_2 + 0,41 \cdot R_2 + 1,94 \cdot \sqrt{\frac{R_2^3}{l_2}}$$

где  $R_2$  - радиус вторичной обмотки и  $l_2$  в дюймах. Тогда суммарную емкость вторичного контура можно записать как:

$$C_2 = C_{мор} + C_{cob2} \quad (2)$$

Расчет индуктивности вторичной обмотки производился по формуле (1). Далее определяем количество витков (размеры в см.,  $L_2$  [мкГн]):

$$n_2 = \frac{\sqrt{5L_2(9d_2 + 20l_2)}}{d_2}$$

и сечение провода:

$$d_{n2} = \frac{l_2}{n_2}$$

Расчет  $M$  и  $k_c$  был произведен с помощью программы MandK 3.1. (Copyright (c) 2000 by Mark S. Rzeszotarski, Ph.D., Chesterland, Ohio, U.S.A.) Программа использует для расчёта двойной интеграл Неймана [3]. Значение коэффициента связи  $k_c = 0,219$  определяется путем изменения высоты расположения начала вторичной обмотки относительно начала первичной.

Индуктивность первичного контура  $L_1$ :

$$L_1 = \frac{M^2}{\sqrt{k_c^2 \cdot L_2}}$$

Ёмкость первичного контура  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{I}{(2\pi \cdot f_{рез})^2 \cdot L_1}$$

где  $f_{рез}$  – значение частоты резонанса.

Найдем коэффициент трансформации:

$$k_T = \sqrt{L_2 / L_1}$$

Тогда выходное напряжение составит:

$$U_2 = U_1 \cdot k_m$$

Проверка по условиям работы четвертьволнового вибратора Герца. Найдем длину волны [2]:

$$\lambda = \frac{c}{f_{рез}} \quad (3)$$

Длина проводника вторичной обмотки.

$$l_{n2} = n_2 \cdot d_2 \cdot \pi \quad (4)$$

Число четвертей длин волн укладываемых во вторичной обмотке

$$n = 4 \cdot \frac{l_{n2}}{\lambda} \quad (5)$$

В нашем случае  $n \approx 1$ , а значит, разрабатываемый трансформатор соответствует условиям работы четвертьволнового вибратора.

В результате расчета были получены следующие данные: первичная обмотка имеет форму усеченного конуса, диаметр первичной

обмотки  $d_{1внутр.} - d_{1внеш.} = 130 - 175$  мм; высота первичной обмотки  $l_1 = 110$  мм; диаметр проводника  $d_{n1} = 6,7$  мм; количество витков  $n_1 = 8$ ; коэффициент связи  $k_c = 0,219$ ; взаимная индуктивность  $M = 216,3$  мкГн;  $L_1 = 7,68$  мкГн;  $C_1 = 195$  нФ; Вторичная обмотка имеет форму соленоида,  $n_2 = 3160$  витков;  $d_{n2} = 0,1$  мм;  $L_2 = 68,76$  мГн;  $C_2 = 15,34$  пФ. Выходное напряжение  $U_{2m} = 29,5$  кВ.

## Результаты измерений.

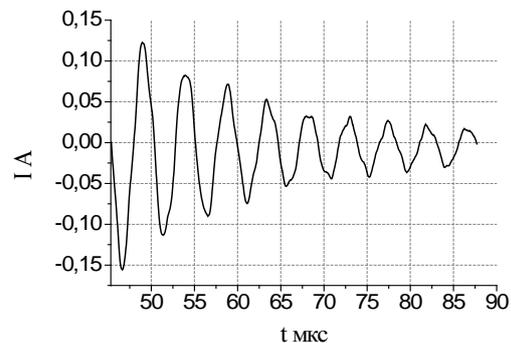


Рис.2. - Осциллограмма тока во вторичном контуре, опыт холостого хода.

Измеренное значение индуктивности  $L_2 = 75$  мГн. По кривой тока (Рис.2.) были определены частота  $f = 212$  кГц, логарифмический коэффициент затухания  $\delta = 0,27$ , определены экспериментальные значения емкости [4],

$$C_2 = \frac{T^2}{L_2 \cdot (4\pi^2 + \delta^2)} = 7,5 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$$

и активного сопротивления

$$R_2 = \frac{\delta^2 L_2}{T} = 8,488 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

## Выводы.

Применяемые инженерные формулы допускают погрешность расчетов. В процессе изготовления неизбежны незначительные отклонения геометрии элементов от расчетных значений. Накопление погрешности может привести к значительным отклонениям резонансной частоты от расчетной. Наиболее чувствительным к геометрии параметром по нашим данным является емкость вторичного контура.

## Список литературы.

1. Коровин С. Д. Мощная импульсная энергетика: Курс лекций.–Томск: Изд. Том. ун-та., 2007.-256 с.
2. Mitch Tilbury The Ultimate Tesla Coil Design and construction Guide. McGraw – Hill Companies inc.: 2008. 413 p.
3. Inductance Calculations: Working Formulas and Tables by Frederick Grover, D. Van, Nostrand Co., 1946, later reprinted by Dover Books.
4. Нейман Л. Р., Калantarов П. Л. Теоретические основы электротехники, ч. 1 и 2, Госэнергоиздат, 1959г.