

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bykovsky A. A.

Design Engineer,

Kaluga branch of JSC NPO them. S.A. Lavochkina

Kaluga city, Russian Federation

CALCULATION OF THE OWN ELECTRIC CAPACITANCE OF THE INDUCTOR AND DETERMINATION OF THE OPTIMAL FORM FACTOR OF THE OSCILLATOR COIL

Быковский А. А.

Инженер-конструктор,

калужский филиал АО НПО им. С.А. Лавочкина.

г. Калуга, Российская Федерация

РАСЧЕТ СОБСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ФОРМ-ФАКТОРА КАТУШКИ-ОСЦИЛЛЯТОРА

Abstract. The mathematical apparatus for calculating the intrinsic capacitance of the Tesla resonator transformer's oscillator coil is given, formulas are derived for calculating the capacitance of the oscillator coil's electrical capacitance for the resonance of the oscillator coil, and the intrinsic resonance frequency of the oscillator coil is compared with the resonance frequency of the Tesla transformer. The conclusion is drawn on the optimal ratio of the form factor in the oscillator coil.

Аннотация. Приведён математический аппарат для расчёта собственной электрической ёмкости катушки-осциллятора резонансного трансформатора Тесла, проведён вывод формул для расчёта электрической ёмкости конденсатора подстройки под резонанс катушки-осциллятора, проведено сравнение собственной резонансной частоты катушки-осциллятора с резонансной частотой трансформатора Тесла. Сделан вывод по оптимальному соотношению форм-фактора в катушке-осцилляторе.

Keywords: Resonant electrical engineering, Tesla resonant transformer, oscillator coil, natural resonant frequency, form factor, resonant frequency, electric capacitance.

Ключевые слова: Резонансная электротехника, резонансный трансформатор Тесла, катушка-осциллятор, собственная резонансная частота, форм-фактор, резонансная частота, электрическая ёмкость.

Постановка проблемы в общем виде и её связь с важными научными и практическими задачами

Конструктивно резонансный трансформатор Тесла (далее – РТТ) представляет собой две соосных катушки, находящихся на одном основании и отделённых друг от друга электрически слоем диэлектрика (например, воздух или трансформаторное масло). Первая катушка РТТ (носит также название «катушка накачки») выполнена из толстого многожильного провода (например, литцендрата) в изоляции и имеет несколько витков (от одного до четырех-пяти). Вторая катушка РТТ (носит также название «катушка-осциллятор») находится внутри катушки-накачки (меньше диаметром) и выполнена из тонкого одножильного провода в изоляции, намотанного в виде спирали виток-к-витку с малым шагом (отношение длины окружности одного витка в сотни раз превосходит шаг спирали намотки) и имеет большое количество витков, в сотни раз превышающее количество витков катушки накачки.

Данное конструктивное исполнение РТТ позволяет его эффективно использовать для резонансных способов передачи электрической энергии на расстояние. Резонансные способы

передачи электрической энергии [1,2] позволяют передавать плотность электрической энергии ($\frac{\text{Ампер}}{\text{мм}^2}$) по сечению провода в сотни раз превышающую плотность электрической энергии, передаваемой классическим способом из-за отсутствия джоулевых потерь (нагрева) в материале провода.

В современной электротехнике и, в частности, электропередачи, актуально стоит задача увеличения плотности тока на единицу площади поперечного сечения проводника. Данную задачу современные учёные пытаются решить при помощи холодной сверхпроводимости.

Технической сложностью является то, что сверхпроводящие материалы максимально проводят электричество только при сохранении ниже заданной температуры, называемой температурой перехода. Недостатком всех устройств является необходимость охлаждения в процессе работы, что требует затрат энергии. Для известных в настоящее время практических сверхпроводников температура значительно ниже 77 Кельвина, температуры жидкого азота. Удержание их ниже этой температуры связано с большим количеством дорогостоящей криогенной технологии. Таким образом, сверхпроводники все

еще не появляются в большинстве бытовой электроники. Следствием этого является то, что количество сэкономленной энергии меньше количества затраченной энергии на охлаждение. То есть низкотемпературные сверхпроводники пока себя не оправдывают экономически.

Однако пилотные проекты такой электропередачи действуют в Европейском союзе, США и Японии:

- 600 метров, 138 кВ, Нью-Йорк, США, разработчик AMSC;
- 1700 метров, 13,8 кВ, Новый Орлеан, США, разработчик Ultera;
- 250 метров, 64 кВ, Йокосука, Япония, разработчик Super-ACE;
- 6000 метров, 50 кВ, Амстердам, Нидерланды, разработчик Ultera.

Кроме того, сверхпроводники используются в сетевых устройствах (трансформаторы, ограничители тока) и индуктивных накопителях энергии [3].

Альтернативный резонансный способ электропередачи устраняет необходимость затраты электроэнергии на охлаждение, поскольку обладает свойством сверхпроводимости при комнатной температуре!

В резонансных системах передачи электрической энергии отсутствует нагрев (пожаробезопасность), в принципе невозможно появление такого явления как короткое замыкание (нет второго, обратного провода – в резонансной системе ток течет в одном направлении – от источника к потребителю). Сложна задача несанкционированного съема электрической энергии с резонансных линий электропередачи. Материал проводника в резонансных линиях электропередачи может быть более дешёвым и более прочным чем медь (например, сталь).

Все вышеперечисленные преимущества открывают возможности для качественно-инновационного развития в области электротехники и электропередачи.

Однако в резонансных системах передачи электрической энергии особую важность приобретает подстройка всех электрических параметров элементов системы (прежде всего индуктивности и электрической ёмкости) к необходимым резонансным значениям.

Именно поэтому вопрос точного определения собственной ёмкости катушки индуктивности (катушки-осциллятора в РТТ прежде всего) становится весьма актуальным при расчете резонансных систем получения, передачи и применения электрической энергии.

Анализ последних исследований и публикаций

В конце XIX века было обнаружено, что катушка индуктивности имеет помимо индуктивности ещё и собственную электрическую ёмкость [7]. На высоких частотах (выше 10^4 Гц) катушка индуктивности входит в резонанс при отсутствии внешней электрической ёмкости. Очевидно, что это происходит по причине наличия

у катушки собственной ёмкости, которая может быть определена из широко известной формулы Томпсона [например: 1, стр. 61]:

$$C_{\text{рез-0}} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_{\text{рез-0}}^2 \cdot L_{\text{КО}}} \quad (1)$$

Где C_0 – собственная ёмкость катушки-осциллятора, в Фарадах;

$f_{\text{рез}}$ – собственная резонансная частота колебаний катушки-осциллятора, в Герцах;

$L_{\text{КО}}$ – индуктивность катушки-осциллятора, в Генри.

Расчетные значения собственной ёмкости катушки-осциллятора составляют весьма незначительные величины (порядка десятков и единиц пикофарада). Тем не менее, собственная ёмкость катушки, что будет показано ниже расчётами, может даже превышать резонансную ёмкость РТТ. Такие значения собственной ёмкости катушки-осциллятора в РТТ кардинально влияют на отстройку от резонансной частоты всего РТТ, и в расчёте резонансных электрических параметров РТТ её абсолютно необходимо учитывать.

Важность правильного расчёта собственной электрической ёмкости катушки-осциллятора подтверждают данные, полученные из эксперимента [1, стр.25 и 154]: *«Если в классической электротехнике, основанной на использовании активного тока в замкнутой цепи, при изменении частоты на 2% передаваемая мощность изменяется незначительно, то в резонансной электротехнике, основанной на использовании реактивного тока в разомкнутой цепи, при изменении частоты на 2% передаваемая мощность снижается до нуля».*

История сложности вопроса определения формулы, по которой можно точно определить собственную ёмкость катушки индуктивности, подробно изложена в [9]. Из анализа этой статьи можно сделать выводы:

1. Катушка индуктивности – это линия передачи с распределенной собственной ёмкостью по высоте катушки (длина линии передачи есть высота катушки)

2. Собственная ёмкость катушки индуктивности значительно зависит от отношения её высоты к диаметру (форм-фактор катушки);

3. Собственная ёмкость катушки индуктивности практически не зависит от межвиткового расстояния (не существует межвитковой ёмкости, т.е. статической ёмкости, которая предположительно существует между витками)

4. Собственный резонанс катушки индуктивности связан с её длиной провода нелинейно

5. Не учитывать влияние частоты на собственную ёмкость, можно в случае, если катушка работает на частотах, не превышающей половины от частоты её собственного резонанса. Это связано с тем, что плотность тока во всех витках не будет одинакова при резонансе

6. Собственная ёмкость катушки индуктивности есть интегральная погонная ёмкость длинной линии, и зависит от длины и формы намотки проводника.

7. Катушка является оптимальной в плане минимального значения собственной ёмкости при соотношении высоты катушки к её диаметру: $\frac{H}{D} \approx 1$

8. Меняя межвитковое расстояние (шаг намотки) меняется индуктивность катушки, но не её собственная ёмкость – соседние витки взаимодействуют друг с другом преимущественно через магнитное поле, а не через электрическое.

Выделение нерешённых ранее частей общей проблемы

Однако как в данной подробной статье [9], так и в другой [8] (где приведена весьма точная формула Р. Вивера (Robert Weaver) по расчету собственной индуктивности катушки), единой формулы для расчета собственной ёмкости катушки нет.

Более того, в классической электротехнике довольно часто встречается ошибка при определении собственной ёмкости катушки индуктивности как функции от межвиткового расстояния, например [4, стр.95].

Кроме того, формула, которая соответствует всем восьми выводам из статьи [8] и которая приведена в [10, стр. 12] неточна.

$$C_{\text{рез-0}} = 10^{-10} \cdot \left(0,1126 \cdot \frac{H}{D} + 0,08 + 0,27 \cdot \sqrt{\frac{D}{H}} \right) \cdot D \quad (2)$$

где $C_{\text{рез-0}}$ – собственная резонансная ёмкость катушки-осциллятора РТТ, в Фарадах;

H – высота катушки-осциллятора, в метрах;

D – диаметр катушки-осциллятора, в метрах.

Формулирование целей статьи

Автор ставит своей целью в данной статье:

- привести математический аппарат для расчёта собственной электрической ёмкости катушки-осциллятора резонансного трансформатора Тесла;

- осуществить вывод формул для расчёта электрической ёмкости конденсатора подстройки под резонанс катушки-осциллятора;

- провести сравнение собственной резонансной частоты катушки-осциллятора с резонансной частотой трансформатора Тесла;

- сделать вывод по оптимальному соотношению форм-фактора в катушке-осцилляторе.

Изложение основного материала

В источнике [10, стр. 8] используется «аналитическое выражения для волнового сопротивления винтового волновода возле четвертьволнового резонанса»:

$$Z_{0-c} = \frac{60}{V_f} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot H}{D} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

«Винтовой волновод возле четверть-волнового резонанса» это тоже самое, что катушка-осциллятор резонансного трансформатора Тесла.

V_f это коэффициент замедления электромагнитной волны (то же самое что K_v) [6]:

$$K_v = \frac{\pi \cdot H}{2 \cdot l} \quad (4)$$

Относительно формулы (3) для определения собственного волнового сопротивления катушки-осциллятора необходимо сделать два уточнения.

Во-первых, формула (3) для четверть-волнового резонатора (катушки-осциллятора) действительно может быть применена, так как электромагнитная волна движется от низа ($H = 0$) к верху катушки ($H = H$) по поверхности волновода, а точнее, по полу-виткам диэлектрика провода (подробнее об этом см. в [6]), тем самым повторяя движение электромагнитной волны по проводу длиной H цилиндрического сечения диаметром D .

Во-вторых, значение $\left[\ln \left(\frac{4 \cdot H}{D} \right) - 1 \right]$ является точным лишь для длинного провода ($H \gg D$), чем, по сути, не является катушка-осциллятор, в которой соотношение $\frac{H}{D} \leq 1$, $\frac{H}{D} \geq 1$, но никак не $\frac{H}{D} \gg 1$.

Тем более, что при $\frac{4 \cdot H}{D} = e$ (число Эйлера $e \approx 2,71828$) значение $\left[\ln \left(\frac{4 \cdot H}{D} \right) - 1 \right]$ приобретает асимптотический разрыв, порождая в умах недостаточно подготовленных исследователей так называемую «отрицательную индуктивность» (при $\frac{4 \cdot H}{D} < e$ значение волнового сопротивления и, как следствие, индуктивность приобретают отрицательные значения). А речь идет просто о неприменимости формулы (3) для расчета коротких проводов.

Согласно [5, стр. 93] индуктивность короткого провода круглого сечения из немагнитного материала определяется формулой:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot l}{d} \right)^2 + 1} \right) + \frac{l}{2 \cdot d} - \sqrt{\left(\frac{l}{2 \cdot d} \right)^2 + 1} \right] \quad (5)$$

где l – длина провода, d – диаметр провода.

Соответственно, применительно к формуле (3), исходя из формулы (5), значение волнового

сопротивления катушки-осциллятора может быть записано:

$$Z_{0-c} = \frac{60}{K_v} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot H}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{2 \cdot H} - \sqrt{\left(\frac{D}{2 \cdot H} \right)^2 + 1} \right] \quad (6)$$

Подставляя значение формулы (4) в формулу (6) получаем формулу для определения собственного волнового сопротивления катушки-осциллятора:

$$Z_{0-c} = \frac{120 \cdot l}{\pi \cdot H} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot H}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{2 \cdot H} - \sqrt{\left(\frac{D}{2 \cdot H} \right)^2 + 1} \right] \quad (7)$$

Соответственно, используя для волнового сопротивления хорошо известное соотношение:

$$Z_{0-c} = \sqrt{\frac{L_{\text{КО}}}{C_{0-c}}} \quad (8)$$

Соответственно, из формулы (8) значение собственной электрической ёмкости катушки-осциллятора составит величину:

$$C_{0-c} = \frac{L_{\text{КО}}}{Z_{0-c}^2} \quad (9)$$

Индуктивность $L_{\text{КО}}$ определяется по формуле: $L_{\text{КО}} = 10^{-7} \cdot \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot w^2}{H} \cdot K_a$ (10) [5, стр. 247], где w – количество витков катушки-осциллятора.

Так как по теореме Пифагора для спирали: $l = \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + s^2}$ и в тоже время $\pi \cdot D \gg s$, то с большой степенью точности можно принять:

$$l = \pi \cdot D \cdot w \quad (11)$$

Тогда формула (10) примет вид:

$$L_{\text{КО}} = 10^{-7} \cdot \frac{l^2}{H} \cdot K_a \quad (12)$$

где K_a – коэффициент Нагаока Хантаро (Nagaoka Hantarō) (коэффициент форм-фактора катушки индуктивности).

Коэффициент Нагаока является функцией от отношения H к D : $K_a = f\left(\frac{H}{D}\right)$ и может быть определён:

- как по таблице 6-2 [5, стр. 250] для $\alpha = \frac{H}{D} \leq 1$, и по таблице 6-2 [5, стр. 251] для $\alpha = \frac{H}{D} \geq 1$, где α – коэффициент форм-фактора;
- так и по весьма точной формуле Харольда Вилера (Harold Alden Wheeler) [11]:

$$K_a = \frac{2 \cdot \alpha}{\pi} \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{\pi}{2 \cdot \alpha} \right) + \frac{1}{2,3004 + 3,437 \cdot \alpha + 1,7636 \cdot \alpha^2 - \frac{0,47}{\left(0,755 + \frac{1}{\alpha}\right)^{1,44}}} \right] \quad (13)$$

Вывод формулы (13) приводится на сайте автора [13].

Подставляя в формулу (9) формулы (7) и (12) получим:

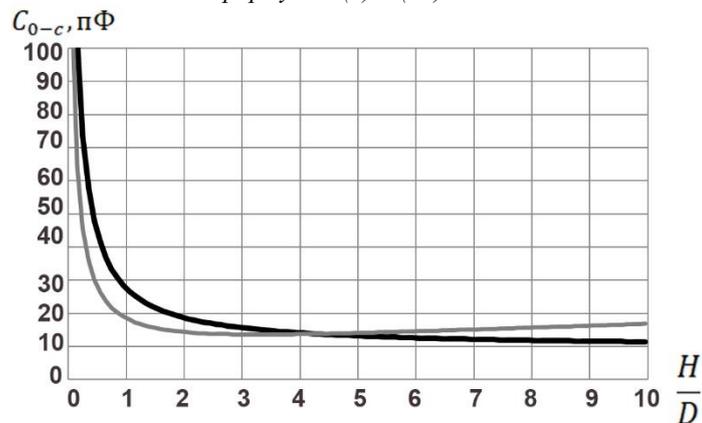
$$C_{0-c} = \frac{10^{-7} \cdot l^2 \cdot K_a \cdot \pi^2 \cdot H^2}{H \cdot 14400 \cdot l^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot H}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{2 \cdot H} - \sqrt{\left(\frac{D}{2 \cdot H} \right)^2 + 1} \right]^2}$$

$$C_{0-c} = \frac{10^{-7} \cdot \pi^2 \cdot H \cdot K_a}{14400 \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot H}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{2 \cdot H} - \sqrt{\left(\frac{D}{2 \cdot H} \right)^2 + 1} \right]^2} \quad (14)$$

Значение собственной резонансной ёмкости катушки-осциллятора по формулам (2) и (14) получается разным.

Данная разница отображена на графике 1.

График 1. Сравнение значения собственной резонансной ёмкости катушки-осциллятора по формулам (2) и (14)



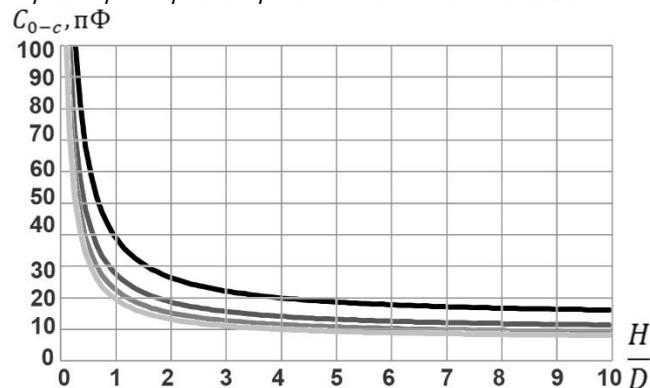
На данном графике: чёрной жирной линией отображена истинная зависимость собственной электрической ёмкости катушки-осциллятора от форм-фактора, рассчитанная по формуле (14).

Серой линией отображена приближённая зависимость собственной электрической ёмкости катушки-осциллятора от форм-фактора, рассчитанная по формуле (2).

Расчёт произведён для резонансной частоты $f_{рез} = 60$ кГц ($l = 1250$ м.); и для провода с диаметром жилы $d_{ж} = 0,0003$ м.; и диаметром провода по изоляции $d_{и} = 0,000355$ м.; коэффициентом неплотности намотки [4, стр.90] $k_{нн} = 1,2$.

Зависимость собственной электрической ёмкости катушки-осциллятора от её форм-фактора на разных резонансных частотах трансформатора Тесла представлена на графике 2.

График 2. Зависимость собственной электрической ёмкости катушки-осциллятора от её форм-фактора на разных резонансных частотах РТТ



Расчёт произведён для провода с диаметром жилы $d_{ж} = 0,0003$ м.; и диаметром провода по изоляции $d_{и} = 0,000355$ м.; коэффициентом неплотности намотки $k_{нн} = 1,2$.

Верхняя 100%-чёрная линия - для резонансной частоты $f_{рез} = 30$ кГц ($l = 2500$ м.);

Вторая сверху 65%-чёрная линия - для резонансной частоты $f_{рез} = 60$ кГц ($l = 1250$ м.);

Третья сверху 50%-чёрная линия - для резонансной частоты $f_{рез} = 90$ кГц ($l = 833,333$ м.);

Нижняя 25%-чёрная линия - для резонансной частоты $f_{рез} = 120$ кГц ($l = 625$ м.).

Определим теперь значение резонансной ёмкости для катушки-осциллятора РТТ.

Резонансная частота РТТ определяется выражением:

$$f_{рез} = \frac{c}{4 \cdot l} \quad (15)$$

Где c – скорость распространения электромагнитной волны (скорость света).

Также известно, что резонансная частота определяется по формуле Томсона:

$$f_{рез} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{КО} \cdot C_{рез}}} \quad (16)$$

Сравнивая формулы (15) и (16) и подставляя в формулу (16) значение формулы (12) получаем:

$$\begin{aligned} \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot l} &= \frac{\sqrt{H}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{10^{-7} \cdot l^2 \cdot K_a \cdot C_{\text{рез}}}} \\ \frac{9 \cdot 10^{16}}{4} &= \frac{H}{\pi^2 \cdot 10^{-7} \cdot K_a \cdot C_{\text{рез}}} \\ C_{\text{рез}} &= \frac{4 \cdot H}{9 \cdot 10^{16} \cdot \pi^2 \cdot 10^{-7} \cdot K_a} \\ C_{\text{рез}} &= \frac{10^{-7} \cdot H}{225 \cdot \pi^2 \cdot K_a} \quad (17) \end{aligned}$$

Соответственно, электрическая ёмкость конденсатора, которая требуется для подстройки катушки-осциллятора в резонанс с РТТ вычисляется по формуле [12, стр. 23]:

$$C_K = C_{\text{рез}} - C_{0-c} \quad (18)$$

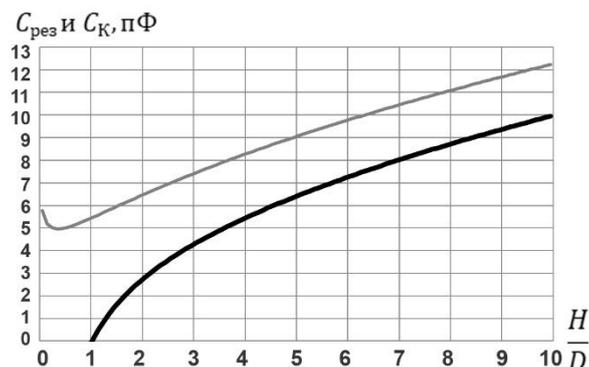
Подставляя в формулу (18) формулы (17) и (14) получим:

$$\begin{aligned} C_K &= \frac{10^{-7} \cdot H}{225 \cdot \pi^2 \cdot K_a} - \frac{10^{-7} \cdot \pi^2 \cdot H \cdot K_a}{14400 \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot H}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{2 \cdot H} - \sqrt{\left(\frac{D}{2 \cdot H} \right)^2 + 1} \right]^2} \\ C_K &= \frac{10^{-7} \cdot H}{225} \cdot \left(\frac{1}{\pi^2 \cdot K_a} - \frac{\pi^2 \cdot K_a}{64 \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot H}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{2 \cdot H} - \sqrt{\left(\frac{D}{2 \cdot H} \right)^2 + 1} \right]^2} \right) \quad (19) \end{aligned}$$

Соответственно, ёмкость подстройки под резонанс РТТ конденсатора катушки-осциллятора определяется по формуле (19).

Отобразим на графике 3 соотношение резонансной ёмкости катушки-осциллятора и ёмкости конденсатора подстройки под резонанс.

График 3. Соотношение резонансной ёмкости катушки-осциллятора и ёмкости конденсатора подстройки под резонанс для $f_{\text{рез}} = 15$ кГц; для провода с диаметром жилы $d_{\text{ж}} = 0,0003$ м.; и диаметром провода по изоляции $d_{\text{и}} = 0,000355$ м.; коэффициентом неплотности намотки $k_{\text{нн}} = 1,2$.



Из анализа графика 3 можно сделать вывод, что при $\alpha = \frac{H}{D} \approx 1,06782$ ёмкость конденсатора подстройки под резонанс $C_K = 0$, т.е. при данном форм-факторе катушки-осциллятора внешний конденсатор не нужен! Резонансные частоты катушка-осциллятор и самого РТТ при данном форм-факторе совпадают.

Автор статьи выяснил, что при любом значении $f_{\text{рез}}$ выполняются следующие условия.

При $\alpha > 1,06782$ возникает необходимость наличия конденсатора подстройки под резонанс,

значение его электрической ёмкости определяется по формуле (19).

При $\alpha < 1,06782$ катушку-осциллятор подстроить под резонанс с РТТ невозможно, поскольку отрицательной ёмкости конденсатора не существует в природе.

Следовательно, катушка-осциллятор должна изначально проектироваться с форм-фактором $\alpha \geq 1,06782$. И весьма желательно чтобы $\alpha = 1,06782$ (в этом случае не нужна добавочная ёмкость конденсатора подстройки C_K).

Назовём величину $\alpha = 1,06782$ «Константой форм-фактора катушки-осциллятора».

На основе всех произведённых в этой статье резонансной частоты катушки-осциллятора с заключений, произведём сравнение собственной резонансной частотой трансформатора Тесла.

Согласно формуле Томсона:

$$\frac{f_{0-c}}{f_{рез}} = \frac{\sqrt{L_K \cdot C_{рез}}}{\sqrt{L_K \cdot C_{0-c}}} = \sqrt{\frac{C_{рез}}{C_{0-c}}}$$

$$\frac{f_{0-c}}{f_{рез}} = \sqrt{\frac{H \cdot 14400 \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot H}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{2 \cdot H} - \sqrt{\left(\frac{D}{2 \cdot H} \right)^2 + 1} \right]^2}{225 \cdot \pi^2 \cdot K_a \cdot 10^{-7} \cdot \pi^2 \cdot H \cdot K_a}}$$

$$\frac{f_{0-c}}{f_{рез}} = \frac{8 \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot H}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{2 \cdot H} - \sqrt{\left(\frac{D}{2 \cdot H} \right)^2 + 1} \right]}{\pi^2 \cdot K_a} \quad (20)$$

Отношение собственной резонансной частоты катушки-осциллятора f_{0-c} к резонансной частоте РТТ $f_{рез}$ в зависимости от форм-фактора катушки-осциллятора представлено на графике 4.

Данная кривая отношения резонансных частот не зависит от резонансной частоты РТТ (длины провода катушки-осциллятора).

График 4. Отношение собственной резонансной частоты катушки-осциллятора к резонансной частоте РТТ в зависимости от форм-фактора катушки-осциллятора.



Из графика видно, что при $\alpha = \frac{H}{D} \approx 1,06782 \frac{f_{0-c}}{f_{рез}} = 1$. Т.е. график 4 ещё раз подтверждает, что при таком форм-факторе частота собственного резонанса катушки-осциллятора совпадает с частотой резонанса РТТ.

Выводы из данного исследования и перспективы

собственная электрическая ёмкость катушки-осциллятора резонансного трансформатора Тесла вычисляется по формуле (14);

электрическая ёмкость конденсатора подстройки под резонанс катушки-осциллятора вычисляется по формуле (19);

сравнение собственной резонансной частоты катушки-осциллятора с резонансной частотой трансформатора Тесла производится по формуле (20);

Главный вывод: оптимальное соотношение форм-фактора катушки-осциллятора для любой резонансной частоты (длины провода катушки-осциллятора): $\alpha = 1,06782$.

Перспективой данного исследования является то, что определено универсальное значение (для любой резонансной частоты) коэффициента форм-фактора катушки-осциллятора, при котором можно

отказаться от дополнительной электрической ёмкости подстройки под резонанс РТТ. Огромным плюсом отказа от дополнительной ёмкости будет отсутствие неизбежных допусков на электрическую ёмкость конденсатора по причине его отсутствия. Соответственно отсутствующие допуски не будут влиять на отстройку от резонанса РТТ катушки-осциллятора.

Список литературы

Монография:

1. Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы получения, передачи и применения электрической энергии. Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: ФБГНУ ФНАЦ ВИМ, 2018. – 572 с.
2. Шогенов А.Х. Теория электрических цепей: учеб. пособие для СПО / А.Х. Шогенов, Д.С. Стребков. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 248 с. – Серия: Профессиональное образование
3. Современная рыночная электроэнергетика Российской Федерации. 2-е издание. – М.: Издательство «Перо», - 396 с., стр.41
4. Радиодетали, радиокомпоненты и их расчет. Под ред. А.В. Ковалева, М.: «Сов. Радио», 1977, 368 с.

5. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. – 488 с.: ил.

Электронный ресурс:

6. Быковский А.А., Андреев М.В. Физический смысл коэффициента замедления скорости электромагнитной волны в катушке-осцилляторе резонансного трансформатора Тесла // Научный альманах, № 6-1 (56), 2019 // <http://www.ucom.ru/doc/na.2019.06.01.pdf>

7. Частота собственного резонанса катушки / <https://coil32.ru/self-resonance-frequency.html>

8. Точный расчет однослойной катушки с произвольным шагом намотки / <https://coil32.ru/man/precise-helix.html>

9. О собственной емкости однослойной катушки индуктивности / <https://coil32.ru/self-capacitance.html>

10. Высокочастотные катушки, винтовые резонаторы и увеличение напряжения из-за когерентных пространственных мод / http://halerman.narod.ru/Tesla/Voltage_Magnification.doc

11. Расчет индуктивности однослойной катушки / <https://coil32.ru/man/onelayer-inductor.html>

12. Mitch Tilbury. The ultimate tesla coil design and construction guide, 443 p. / <http://bookfi.net/book/613556>

13. Wheeler H.A. Numerical Methods for Inductance Calculation. Empirical Formulae - Wheeler's Continuous Inductance Formula / <http://electronbunker.ca/eb/CalcMethods3b.html>