

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЗОНАНСНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Д.С. СТРЕБКОВ, академик РАСХН, директор
 И.Р. ИЗИЛЯЕВ, аспирант
 ВИЭСХ Россельхозакадемии
 E-mail: viesh@dol.ru

Резюме. В статье приведена методика расчета резонансного высоковольтного трансформатора, использующегося в резонансной системе передачи электрической энергии. Предложено конструктивное решение для повышения эффективности преобразования и передачи электрической энергии, а также для увеличения электрической прочности изоляции высоковольтной обмотки резонансного высоковольтного трансформатора.

Ключевые слова: резонансный высоковольтный трансформатор, дополнительная однослойная катушка, резонатор, индуктивность, емкость, добротность.

Первый резонансный высокочастотный высоковольтный трансформатор создал Н. Тесла в 1889–1890 гг. [1...4]. Более совершенный образец был разработан и испытан в лаборатории Лонг Айленд в 1902–1906 гг. и запатентован в 1914 г. [5]. Устройство включает в себя резонансный трансформатор Тесла и дополнительную однослойную катушку, которая при высокой частоте из классической индуктивности превращается в спиральный волновод или электрический резонатор с распределенными параметрами, которые невозможно рассчитать, используя классическую теорию электрических цепей [6].

Цель наших исследований разработка методики расчета параметров резонансного высоковольтного трансформатора с повышенной прочностью изоляции обмоток, которая позволит проектировать резонансные генераторы на 1...50 млн вольт и продолжить опыты, которые проводил Н. Тесла в лабораториях Колорадо-Спрингс и Лонг Айленд.

Условия, материалы и методы. Питающий трансформатор имеет электрическую мощность 50 кВА, входное напряжение $V = 1000$ В, частоту 140 Гц, выходное напряжение $V_1 = 70$ кВ.

Электрическая энергия от повышающего трансформатора 1 (рис. 1) поступает на искровой разрядник 2 и затем через конденсаторы C_1 , на высокочастотный резонансный трансформатор 3 с обмотками L_1 и L_2 . Один вывод высоковольтной обмотки L_2 заземлен, а второй – присоединен к четвертьвольновой резонансной линии, состоящей из спирального волновода 4 L_3 и сферической емкости C_3 .

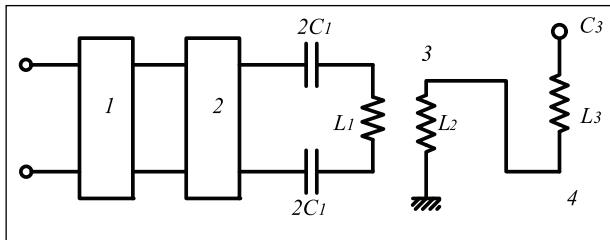


Рис. 1. Электрическая схема высокочастотного резонансного трансформатора Н. Тесла [4]: 1 – повышающий трансформатор; 2 – искровой разрядник; 3 – резонансный трансформатор; 4 – дополнительная спиральная обмотка, C_1 – емкость первичной обмотки трансформатора, C_3 – сферическая емкость.

При наличии колебаний в контуре $L_1 C_1$ электромагнитная энергия передается через вторичную обмотку L_2 в спиральный волновод 4 на частоте f_0 при напряжении $V_2 = nV_1$, где n – коэффициент трансформации трансформатора 3, f_0 – резонансная частота контура $L_1 C_1$.

Резонансный трансформатор сделан в виде круглой замкнутой деревянной изгороди диаметром $D_1 = 15$ м, высотой $H_1 = 2,44$ м. Первичная обмотка состоит из двух секций, каждая из которых выполнена из 37 медных проводов, обе секции соединены параллельно. Количество витков $N_1 = 1$. Индуктивность первичной обмотки $L_1 = 27$ мГн. Активное сопротивление первичной обмотки на частоте 90 кГц $R_1 = 8$ Ом. Емкость в первичной обмотке $C_1 = 0,12$ мкФ.

Вторичная обмотка состоит из $N_2 = 20$ витков, намотанных плотно один к другому из двух параллельно соединенных проводов диаметром $d_w = 2,55 \cdot 10^{-3}$ м.

Индуктивность вторичной обмотки $L_2 = 9$ мГн, коэффициент трансформации $n_T = N_2/N_1 = 20$. Энергия заряженного конденсатора $Q = C_1 \cdot V^2/2$. Подставив $C_1 = 0,12$ мкФ, $V = 70$ кВ, получим $Q = 300$ Дж.

Мощность, подаваемая на первичную обмотку $P_{\text{эл}} = Q \cdot n$, где n – число разрывов цепи в секунду Продолжительность соединения конденсатора с первичной обмоткой T_c определяет время конденсатора (время горения дуги в искровом разряднике). $T_c = 10 \dots 100$ мкс и $n = 10 \dots 100$ кГц.

Ток разряда конденсатора равен $I_1 = 10000$ А.

Резонансная частота в первичной цепи:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1}}.$$

При $C_1 = 0,12$ мкФ, $L_1 = 27$ мГн получим $f_0 = 88,5$ кГц.

Длина волны $\lambda_0 = 300 \cdot 10^5 / f_0 = 3390$ м.

Напряжение на емкости C_1 :

$$V_C = I \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}.$$

При $I = 10000$ А, $L_1 = 27$ мГн, $C_1 = 0,12$ мкФ получим $V_c = 150000$ В.

Напряжение на индуктивности L_1 :

$$V_{L1} = I \cdot 2\pi f_0 \cdot L_1 \approx 150000 \text{ В.}$$

Напряжение на L_2 :

$$V_{L2} = n_T \cdot V_{L1} = 3 \cdot 10^6 \text{ В.}$$

Для увеличения эффективности преобразования и передачи электрической энергии необходимо снижать потери на сопротивлении обмоток трансформатора при работе на повышенной частоте и увеличивать добротность высоковольтной обмотки. Для этого разработана конструкция электрического высокочастотного трансформатора со спиральной высоковольтной обмоткой, которая состоит из нескольких последовательно соединенных секций изолированного проводника, площадь сечения которого различна для каждой секции и уменьшается по мере удаления секции от начала спиральной обмотки согласно уравнению [7]:

$$\frac{\cos\varphi_i}{s_i} = \text{const}, \quad (1)$$

где $\cos\varphi_i$ – нормированное значение тока i -й секции; $\cos\varphi_i = I_i / I_0$, где I_i – ток в i -й секции, I_0 – ток в начале

первой секции; S_i – сечение проводника в i -й секции; $0 \leq \varphi_i \leq \pi/2$.

Высокочастотный генератор 1 (рис. 2) через емкости 2 подключен к низковольтной обмотке 3 высокочастотного трансформатора 4. Высоковольтная обмотка 5 выполнена в виде спиральной катушки с длиной проводника l_B , равной $1/4$ длины волны тока и напряжения. Начало спиральной обмотки соединено с концом низковольтной обмотки и через емкость с одним из выводов высокочастотного генератора.

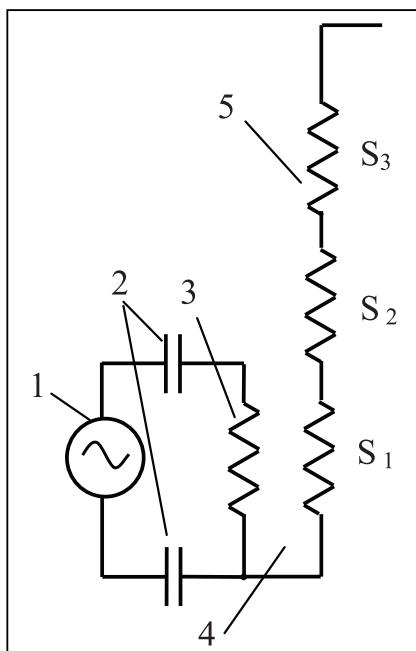


Рис. 2. Электрическая схема резонансного трансформатора.

Высоковольтная обмотка 5 состоит из секций S_1 , S_2 , S_3 с разным сечением проводника.

Для увеличения электрической прочности изоляции высоковольтной обмотки необходимо изменять ее толщину по длине обмотки. Толщина изоляции проводника секций S_1 , S_2 , S_3 увеличивается по мере удаления от начала спиральной обмотки согласно уравнению [8]:

$$\frac{\sin\psi_i}{\delta_i} = \text{const}, \quad (2)$$

где $\sin\psi_i$ – нормированное значение напряжения i -й секции; $\sin\psi_i = V_i/V_0$, где V_i – напряжение в конце i -й секции, V_0 – ток в конце спиральной обмотки; δ_i – толщина электрической изоляции в i -й секции; $0 \leq \psi_i \leq \pi/2$.

Результаты и обсуждение. Расчет параметров дополнительной обмотки (extra-coil по терминологии Н. Тесла) проведем (см. рис. 1), используя современные представления о принципах действия и параметрах спирального проводника [9, 10]. Спиральная дополнительная обмотка Н. Тесла – это спиральный волновод и цилиндрическая спиральная антенна, которая обладает следующими свойствами:

выполняет функции замедляющей системы, в которой фазовая скорость распространения электромагнитной волны значительно меньше, чем в свободном пространстве;

при малом шаге спирали излучение фокусируется по оси спиральной антенны;

четвертьволновой волновод 4 может работать в режиме накачки электромагнитной энергии с по-

следующим освобождением запасенной в емкости C_3 энергии в короткий промежуток времени. По существу, спиральный волновод 4 – это аналог лазера, работающего в диапазоне низких частот 1...1000 кГц.

Накачка электромагнитной энергии в волноводе 4 осуществляется от резонансного трансформатора 3 [11]. При подаче напряжения падающая волна поступает на вход волновода 4 и отражается обратно от его разомкнутого конца без изменения фазы. Отраженная волна достигает начала волновода 5, замкнутого на L_2 , и повторно отражается с изменением фазы на 180° . Волна напряжения проходит дважды через четвертьволновую линию 4 (туда и обратно), ее фаза изменяется при движении также на 180° и поэтому совпадает с фазой волны, поступающей от источника энергии L_2 . В результате амплитуда волны напряжения удваивается через каждые два отражения: от конца и начала волновода 4. Возникает стоячая волна в виде одной четверти синусоидальной волны с началом синусоиды в начале волновода 4 с напряжением V_{\min} и напряжением V_{\max} в конце волновода на емкости C_3 .

Увеличение напряжения на выходе волновода 4 определяется не добротностью Q контура, как в обычной разомкнутой линии, а величиной α , обратной произведению коэффициента затухания волны α на длину H волновода 4, то есть α обратно пропорциональна потерям энергии в волноводе $\alpha = 1/(\alpha \cdot H)$.

Когерентность обеспечивает синхронизация частоты f_0 со скоростью v распространения волны напряжения в волноводе и его длиной H :

$$H = \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda \cdot \vartheta}{c} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\vartheta}{f_0}. \quad (3)$$

Накачка происходит по аналогии с лазером в режиме модулированной добротности, когда добавленная энергия поступает когерентно через промежуток времени T_k , равный прохождению волны от начала до конца волновода и обратно:

$$T_k = \frac{2H}{\vartheta} = \frac{1}{2f_0}. \quad (4)$$

Напряжение на емкости C_3 определяется потерями в четвертьволновой резонансной линии и электрической прочностью изоляции. Оно превышает напряжение на выходе резонансного трансформатора L_2 в 20-200 раз и может достигать 100 млн вольт.

Параметры дополнительной обмотки H . Тесла: диаметр обмотки (L_3) $D = 2,515$ м; высота $H = 2,44$ м; число витков $N_3 = 95$. Обмотка выполнена однослойной из медного провода диаметром 1,25 мм. Длина обмотки $L_3 = 2\pi DN_3 = 1500$ м, расстояние между витками $t = 0,0125$ м. Емкость $C_3 = 300$ пФ.

Расчет спиральной обмотки проводится по известным формулам четвертьволновой разомкнутой на конце линии [10, 12].

Напряжение в линии представляет сумму падающей и отраженной волн, интерференция которых образует стоячие волны. Коэффициент распространения волны $\gamma = \alpha + i\beta$.

Коэффициент затухания α определяется потерями на сопротивлении в линии и диэлектрическими потерями в шунтовом сопротивлении.

Фазовая постоянная $\beta = 2\pi/\lambda$.

Напряжение на выходе обмотки длиной l :

$$V_h = V_{bx}/(al), \quad l = (2n + 1) \cdot n/4, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Коэффициент потерь

$$\alpha_1 = \frac{R_0}{2Z_0} = \frac{R_{\text{потерь}}}{2Z_0}, \quad (6)$$

где R_0 – сопротивление 1 погонного метра, Ом; Z_0 – эффективное сопротивление антенны, Ом.

$$Z_0 = (60/K_u) \cdot [\ln(4H/D) - 1], \quad (7)$$

где D – диаметр спиральной обмотки, м; K_u – коэффициент снижения скорости распространения волны в спиральной обмотке.

$$K_u = \frac{v}{c} = \frac{1}{\sqrt{1+20 \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{2,5} \cdot \left(\frac{D}{\lambda_0}\right)^{0,5}}}, \quad (8)$$

где D – диаметр спиральной обмотки, м; t – расстояние между витками, м; c – скорость света, м/с; v – скорость распространения волны, м/с; λ_0 – длина волны в свободном пространстве, м.

Подставляя в (8) $D = 2,515$ м, $t = 0,0125$ м, $\lambda_0 = 3390$ м, получим $K_u = 0,00179$.

Подставив в (7) $K_u = 0,00179$, $H = 2,44$ м, $D = 2,515$ м, получим $Z_0 = 11732$ Ом.

Коэффициент потерь:

$$\alpha l = \frac{19,53 \cdot 10^{-2} \cdot (H/D)^{1/5}}{d_w \cdot z_0 \cdot \sqrt{f_o (\text{МГц})}} \text{ [Непер]}, \quad (9)$$

где H – высота спиральной обмотки, м; d_w – диаметр провода, м.

Подставляя в (9) $H = 2,44$ м, $D = 2,515$ м, $Z_0 = 94156$ Ом, $d_w = 0,0125$ м, $f_o = 88,5 \cdot 10^{-3}$ МГц, получим $\alpha l = 0,00445$ Непер.

Подставляя в (5) $\alpha l = 0,00445$ Непер, $V_{L2} = 3 \cdot 10^6$ В, найдем предельно возможное напряжение на выходе спирального волновода $V_H = V_{L2}/(\alpha l) = 674 \cdot 10^6$ В. Практически достижимое напряжение V_H ограничено потерями цепи и может достигать 20...100 млн вольт.

При работе генератора с частотой $f_o \geq 6$ Гц вокруг точки заземления обмотки L_2 осесимметрично возникают стоячие волны, узлы и пучности которых рас-

положены на Земле в виде окружностей с центрами на вертикали, проходящей через точку заземления генератора. При частоте менее 6 Гц Земля, как однопроводная линия, не проявляет резонансных свойств и ведет себя, как статическая емкость [4].

Оценим величину напряжения V_n на приемнике при резонансной передаче электрической энергии с использованием Земли в качестве проводника. Обозначим C_r и V_r , C_n и V_n естественную емкость и напряжение на этой емкости, соответственно, генератора и приемника, C_0 – статическая емкость Земли.

Статическая емкость Земли $C_0 = 4 \cdot \pi \epsilon_0 \cdot R_3$, где ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ мкФ.

Подставляя $R_3 = 6363$ км, получим $C_0 = 708$ мкФ.

Сферическая емкость генератора в лаборатории Long Island радиусом 10,3 м равна $C_r = 1,14$ нФ.

Сферическая емкость приемника радиусом 20 см равна $C_n = 22$ пФ.

Напряжение на приемнике $V_n = V_r \cdot C_r / (C_0 + C_n)$.

Подставляя $V_r = 30$ МВ, $C_r = 1,14$ нФ, $C_n = 708$ мкФ, $C_0 = 22$ пФ, получим $V_n = 48,8$ В.

Почему Н. Тесла использовал трансформаторы большого диаметра, а витки дополнительной обмотки на каркасе располагал на расстоянии, соизмеримом или превышающем диаметр провода? Очевидно, это делалось для снижения потерь в резонансном контуре путем увеличения добротности и снижения паразитной межвитковой емкости обмоток. Для уменьшения потерь на вихревые токи первичная обмотка трансформатора Н. Тесла состояла из множества параллельных ветвей многожильного провода (аналог современного лицендрата). Поэтому, несмотря на гигантские токи и потоки реактивной мощности в контурах, потери активной мощности Н. Тесла оценивал в 3...4 % от передаваемой мощности.

Выводы. Таким образом, разработана методика расчета параметров резонансного высоковольтного трансформатора. Предложено секционирование обмотки трансформатора с целью увеличения электрической прочности изоляции высоковольтной обмотки.

Литература.

1. Tesla N. Lectures. Patents. Articles. Published by N.Tesla Museum. Beograd, 1956. – 715 pp.
2. Tesla N. Electrical transformer US Pat № 593138. 02.11.1897.
3. Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy US Patent № 649621/15.05.1900.
4. Tesla N. Colorado Springs Notes 1899 – 1900. Published by Nolit, Beograd, 1978, 437 p.p.
5. Tesla N. Apparatus for transmitting electrical energy US Patent № 1 119732/01.12.1914.
6. Стребков Д.С. Никола Тесла и современные проблемы электроэнергетики. – ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, № 3, 2006.
7. Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы передачи и применения электрической энергии. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. 351 с.
8. Стребков Д.С., Некрасов А.И. и др. Электрический высокочастотный трансформатор. Пат.РФ № 2337423 от 07.09.2007. Опубл. 27.10.2008 Бюл. № 30.
9. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот. – М.: Советское Радио, 1957.
10. Schelkunoff S.A. Advanced Antenna Theory. Wiley, N.Y., 1952.
11. Jordan E.L.. Balmain K.G. Electromagnetic Waves and Radiating System. Prentice Hall Second Edition. 1968, p. 226-227.
12. Corum I.F.. Corum K.L. A technical Analysis of the Extra Coil as a Slow Wave Helical Resonator // Proceedings the 1986 International Tesla Symposium. Colorado Springs, Colorado, International Tesla Society, Inc., 1986. Pp. 2-1-2-24.

CALCULATION METHOD OF RESONANT HIGH VOLTAGE TRANSFORMER

D. S. Strebkov, I.R. Izilyaev

Summary. The article describes the method of calculation of resonant high voltage transformer used in a resonant system of transmission of electrical energy. It is proposed a constructive solution to improve the efficiency of transformation and transmission of electric energy, as well as to increase the electrical insulation strength of high-voltage winding of a resonant high voltage transformer.

Key words: resonant high voltage transformer, extra-coil, resonator, inductance, capacitance, quality factor.