

**РАСЧЕТ РЕЗОНАНСНОГО  
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА**

**CALCULATION OF A HIGH-  
VOLTAGE RESONANT GENERATOR**

Верютин В.И., Стребков Д.С.,  
ВИЭСХ (г. Москва, Россия)

**Аннотация**

*Целью работы является расчет параметров резонансного высоковольтного генератора на примере генератора, испытанного Н.Тесла в лаборатории Колорадо-Спрингс. Приведенная методика расчета и детальная информация о параметрах резонансного генератора Н.Тесла позволит читателям самостоятельно проектировать резонансные генераторы на 1–50 миллионов вольт и продолжить опыты, которые проводил Н.Тесла в лабораториях Колорадо-Спрингс и Лонг Айленд*

**Abstract**

*The purpose of the work is the calculation of parameters of the resonant high-voltage generator by the example of the generator tested by N.Tesla in the Colorado Springs laboratory. The calculation method and the detailed data on the parameters of the N.Tesla's resonant generator will allow to readers to design independently 1-50 MV resonant generators and to continue experiments which N.Tesla carried out in the Colorado Springs and Long Island laboratories*

Первый резонансный высокочастотный высоковольтный генератор был создан и испытан Н. Тесла в лаборатории Колорадо-Спрингс в 1899 -1990 годах. [1 – 4]. Более совершенный образец резонансного генератора был разработан и испытан в лаборатории Лонг Айленд (Long Island) в 1902 – 1906 годах и запатентован в 1914 г [5]. Резонансный генератор включает 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].

Целью работы является расчет параметров резонансного высоковольтного генератора на примере генератора, испытанного Н. Тесла в лаборатории Колорадо-Спрингс [4].

Электрическая схема высокочастотного резонансного генератора сверхвысокого напряжения показана на рис. 1 [4]. 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 поступает на искровой разрядник 2 и затем через конденсаторы  $C_3$  на высокочастотный резонансный трансформатор 3 с обмотками  $L_1$  и  $L_2$ . Один вывод высоковольтной обмотки  $L_2$  заземлен, а второй вывод обмотки  $L_2$  присоединен к четвертьволновой резонансной линии, состоящей из спирального волновода 4  $L_3$  и сферической емкости  $C_3$ .

При наличии колебаний в контуре  $L_1C_1$  электромагнитная энергия передается через вторичную обмотку  $L_2$  в спиральный волновод 5 на частоте  $f_0$  при напря-

жении  $V_2 = nV_1$ , где  $n$  – коэффициент трансформации трансформатора 4,  $f_0$  – резонансная частота контура  $L_1C_1$ .

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 секций 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 друг к другу из двух параллельно соединенных проводов диаметром  $d_w = 2,55 \cdot 10^{-3}$  м.

Индуктивность вторичной обмотки  $L_2 = 9$  мГн.

Коэффициент трансформации  $n_T = \frac{N_2}{N_1} = 20$ .

Энергия заряженного конденсатора  $Q = \frac{1}{2} C_1 V^2$ .

Подставляя  $C_1 = 0,12$  мкф,  $V = 70$  кВ, получим  $Q = 300$  Дж.

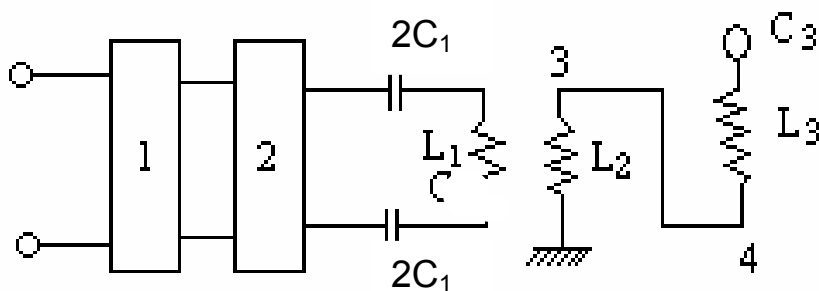


Рис. 1. Электрическая схема высокочастотного резонансного генератора Н. Тесла (лаборатория Колорадо-Спрингс, 1899 г.) 1 – повышающий трансформатор; 2 – искровой разрядник; 3 – резонансный трансформатор; 4 – дополнительная спиральная обмотка,  $C_3$  – сферическая ёмкость.

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

$T_c = 10 - 100$  мкс и  $n = 10-100$  кГц.

Ток разряда конденсатора равен  $I_1 = 10000$  А.

Резонансная частота в первичной цепи  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}$ .

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

Длина волны  $\lambda_0 = \frac{300 \cdot 10^5}{f_0} = 3390$  м.

Напряжение на емкости  $C_1$ :

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

При  $I = 10000$  А,  $L_1 = 27$  мкГн,  $C_1 = 0,12$  мкф, получим  $V_C = 150000$  В.

Напряжение на индуктивности  $L_1$  (первичная обмотка трансформатора Тесла):

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

Напряжение на  $L_2$  (вторичная обмотка трансформатора Тесла):

$$V_{L_2} = n_T V_{L_1} = 3 \cdot 10^6 \text{ В.}$$

Расчет параметров дополнительной обмотки (extra-coil по терминологии Н. Тесла) проведем, используя современные представления о принципах функционирования и параметрах спирального проводника [7, 8]. Спиральная дополнительная обмотка Н. Тесла является спиральным волноводом и цилиндрической спиральной антенной и обладает тремя замечательными свойствами:

1. Она выполняет функции замедляющей системы, в которой фазовая скорость распространения электромагнитной волны значительно меньше, чем скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве.
2. При малом шаге спирали излучение антенны фокусируется по оси спиральной антенны.
3. Особенностью четвертьволнового волновода 5 является его способность работать в режиме накачки электромагнитной энергии с последующим освобождением запасенной в емкости 6 энергии в короткий промежуток времени. По существу спиральный волновод 5 представляет аналог лазера, работающего в диапазоне низких частот 1 – 1000 кГц.

Накачка электромагнитной энергии в волноводе 5 производится от резонансного трансформатора 4 следующим образом [9]. При подаче напряжения от трансформатора 2 на волновод 5 падающая волна поступает на вход волновода 5 и отражается обратно от его разомкнутого конца без изменения фазы волны. Отраженная волна достигает начала волновода 5, замкнутого на  $L_2$ , и повторно отражается с изменением фазы волны на  $180^\circ$ . Волна напряжения проходит дважды через четвертьволновую линию 5 (туда и обратно), ее фаза изменяется при движении также на  $180^\circ$  и поэтому ее фаза 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 5. Возникает стоячая волна в виде одной четверти синусоидальной волны с началом синусоиды в начале волновода 5 с напряжением  $V_{\min.}$  и максимальным напряжением  $V_{\max.}$  в конце волновода на емкости  $C_3$ .

Увеличение напряжения на выходе волновода 5 определяется не добротностью  $Q$  контура, как в обычной разомкнутой линии, а величиной  $\alpha$ , обратной произведению коэффициента затухания волны  $\alpha$  на длину  $H$  волновода 5, т.е.  $\alpha$  обратно пропорциональна потерям энергии в волноводе  $\alpha = \frac{1}{\alpha H}$ .

Когерентность обеспечивается за счет синхронизации частоты  $f_0$  со скоростью  $u$  распространения волны напряжения в волноводе и его длины  $H$ .

$$H = \frac{1}{4} \frac{\lambda u}{c} = \frac{1}{4} \frac{u}{f_0} \quad (1.9)$$

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

$$T_k = \frac{2H}{u} = \frac{1}{2f_0}. \quad (1.10)$$

Напряжение на емкости 6 определяется потерями в четвертьволновой резонансной линии и электрической прочностью изоляции и превышает напряжение на выходе резонансного трансформатора  $L_2$  в 20 – 200 раз и может достигать величины 100 миллионов вольт.

Параметры дополнительной обмотки Н. Тесла: диаметр дополнительной 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 производится по известным формулам четвертьволновой разомкнутой на конце линии [8, 10].

Напряжение в линии представляет сумму падающей и отраженной волны, интерференция которых образует стоячие волны. Коэффициент распространения волны:

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

Коэффициент затухания  $\alpha$  определяется потерями на сопротивлении в линии и диэлектрическими потерями в шунтовом сопротивлении.

$$\text{Фазовая постоянная } \beta = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Напряжение на выходе обмотки длиной  $l$ :

$$V_n = \frac{V_{ex}}{\alpha l}, \quad l = \frac{(2n+1)n\lambda}{4}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1.11)$$

Коэффициент потерь

$$\alpha l = \frac{R_0 l}{2Z_0} = \frac{R_{потерь}}{2Z_0}, \quad (1.12)$$

где  $R_0$  – сопротивление 1 погонного метра, Ом;

$Z_0$  – эффективное сопротивление антенны;

$\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{K_u} \quad (1.13)$$

$K_u$  – коэффициент снижения скорости распространения волны в спиральной обмотке:

$$K_u = \frac{u}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 + 20 \left( \frac{D}{t} \right)^{2,5} \left( \frac{D}{\lambda_0} \right)^{0,5}}}, \quad (1.14)$$

Где  $D$  – диаметр спиральной обмотки;

$t$  – расстояние между витками;

$c$  – скорость света;

$u$  – скорость распространения волны.

Подставляя в (1.14)  $D = 2,515$  м,  $t = 0,0125$  м,  $\lambda_0 = 3390$  м, получим  $K_u = 0,00179$ .

Эффективное сопротивление спиральной обмотки

$$Z_0 = \frac{60}{u_f} \left[ \ln \frac{4H}{D} - 1 \right]. \quad (1.15)$$

Подставляя в (1.15)  $K_u = 0,00179$ ,  $H = 2,44$  м,  $D = 2,515$  м, получим  $Z_0 = 11732$  Ом.

Коэффициент потерь

$$\alpha l = \frac{19,53 \cdot 10^{-2} \left( \frac{H}{D} \right)^{\frac{1}{5}}}{d_w \cdot Z_0 \sqrt{f(\text{МГц})}} \text{ Непер.}, \quad (1.16)$$

$H$  – высота спиральной обмотки;

$d_w$  – диаметр провода, м.

Подставляя в (1.16)  $H = 2,44$  м,  $D = 2,515$  м,  $Z_0 = 94156$  Ом,  $d_w = 0,0125$  м,  $f_l = 88,5 \cdot 10^{-3}$  МГц, получим  $\alpha l = 0,00445$  Непер.

Подставляя в (1.11)  $\alpha H = 0,00445$  Непер,  $V_{L_2} = 3 \cdot 10^6$  В, найдем предельное возможное напряжение на выходе спирального волновода  $V_H = \frac{V_{L_2}}{\alpha l} = 674 \cdot 10^6$  В.

Практически достижимое напряжение  $V_H$  ограничено потерями в цепи и может достигать 20 – 100 миллионов вольт. Н. Тесла писал в своей автобиографии, что при диаметре сферической ёмкости  $C_3$  30 футов (9,15 м) ток разряда ёмкости составляет 2000 – 4000 А. Башня в лаборатории Лонг Айленд имела высоту 57 м и диаметр сферической ёмкости 20,74 м. При напряжении генератора  $100 \cdot 10^6$  В и разрядном токе конденсатора 10000 А максимальная импульсная мощность генератора составит 1 ТВт.

Почему Н. Тесла использовал трансформаторы большого диаметра, а витки дополнительной обмотки на каркасе располагал на расстоянии друг от друга, соизмеримом или превышающем диаметр провода? Очевидно, это делалось для снижения потерь в резонансном контуре за счет увеличения добротности и снижения паразитной межвитковой ёмкости обмоток. Для снижения 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.

При работе генератора с частотой  $f_0 \geq 6 \text{ Гц}$  вокруг точки заземления обмотки  $L_2$  осесимметрично возникают стоячие волны, узлы и пучности которых расположены 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 ёмкость [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 ёмкость и напряжение на этой ёмкости соответственно, генератора и приемника,  $C_0$  – статическая ёмкость Земли.

Статическая ёмкость Земли  $C_0 = 4 \cdot \pi \varepsilon_0 \cdot R_3$ , где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  
 $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}$ .

Подставляя  $R_3 = 6363 \text{ км}$ . Получим  $C_0 = 708 \text{ мкф}$ .

Ёмкость сферической ёмкости генератора в лаборатории Long Island радиусом 10,3 м равна  $C_r = 1,14 \text{ нф}$ .

Ёмкость сферической ёмкости приемника радиусом 20 см равна  $C_n = 22 \text{ пф}$ .

Напряжение на приемнике

$$V_n = V_r \frac{C_r}{C_0 + C_n}.$$

Подставляя  $V_r = 30 \text{ МВ}$   $C_r = 1,14 \text{ нф}$ ,  $C_n = 708 \text{ мкф}$ ,  $C_n = 22 \text{ пф}$ , получим  $V_n = 48,8 \text{ В}$ .

Приведенная методика расчета и детальная информация о параметрах резонансного генератора Н. Тесла позволит читателям самостоятельно проектировать резонансные генераторы на 1 – 50 миллионов вольт и продолжить опыты, которые проводил Н. Тесла в лабораториях Колорадо-Спрингс и Лонг Айленд.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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, 2006, № 3, с. 47 – 52.
7. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот. М.: Советское Радио, 1957. С. 602-641.
8. Schelkunoff S.A. Advanced Antenna Theory. Wiley, N.Y., 1952.
9. Jordan E.L., Balmain K.G. Electromagnetic Waves and Radiating System. Prentice Hall, Second Edition, 1968, p. 226-227.
10. 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.