

РАСЧЕТ РЕЗОНАНСНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА

Стребков Д.С., академик РАСХН
Всероссийский научно-исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства, г. Москва

Первый резонансный высокочастотный высоковольтный генератор был создан и испытан Н. Тесла в лаборатории Колорадо-Спрингс в 1889-1890 гг. [1-4]. Более совершенный образец резонансного генератора был разработан и испытан в лаборатории Лонг Айленд (Long Island) в 1902-1906 гг. 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 $L_1 C_1$ электромагнитная энергия передается через вторичную обмотку L_2 в спиральный волновод 5 на частоте f_0 при напряжении $V_2 = nV_1$, где n — коэффициент трансформации трансформатора 4, 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 выполнена из 37 медных проводов, обе секции соединены параллельно. Количество витков $N_1 = 1$. Индуктивность первичной обмотки $L_1 = 27$ мкГн. 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 $n_T = N_2/N_1 = 20$.

Энергия заряженного конденсатора $Q = C_1 \cdot V^2/2$.

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

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

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_1 C_1}).$$

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

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

Напряжение на емкости C_1 $V_C = I\sqrt{L_1/C_1}$.

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

Напряжение на L_2 (вторичная обмотка трансформатора Тесла) $V_{L_2} = n_T V_{L_1} = 3 \cdot 10^6$ В.

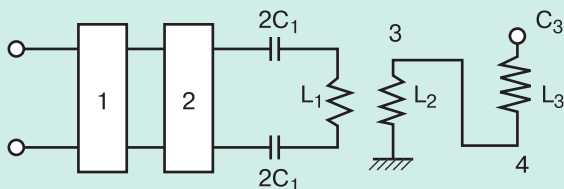


Рис. 1. Электрическая схема высокочастотного резонансного генератора Н. Тесла (лаборатория Колорадо-Спрингс, 1899 г.)

1 — повышающий трансформатор; 2 — искровой разрядник; 3 — резонансный трансформатор; 4 — дополнительная спиральная обмотка, C_3 — сферическая емкость

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. Эта обмотка 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° . Волна напряжения проходит дважды через четвертьволновую линию 5 (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 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 α , обратной произведению коэффициента затухания волны α на длину H волновода 5, то есть α обратно пропорциональна потерям энергии в волноводе $\alpha = 1/(\alpha H)$.

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 промежуток 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 млн 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 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 :

$$V_H = V_{вх}/(\alpha l), \quad l = (2n + 1)n\lambda/4, \quad n = 0, 1, 2, 3... \quad (1.11)$$

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;

λ_0 — длина волны в свободном пространстве:

$$\lambda_0 = \lambda/K_u \quad (1.13)$$

K_u — коэффициент снижения скорости распространения волны в спиральной обмотке

$$K_u = \frac{u}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 + 20(D/t)^{2.5}(D/\lambda_0)^{0.5}}}, \quad (1.14)$$

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

$$Z_0 = (60/u_f)[\ln(4H/D) - 1] \quad (1.15)$$

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

Коэффициент потерь

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

где 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, $f_1 = 88,5 \cdot 10^{-3}$ МГц, получим $\alpha I = 0,00445$ 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 $V_H = V_{L_2}/(\alpha l) = 674 \cdot 10^6$ В. Практически достижимое напряжение V_H ограничено потерями в цепи и может достигать 20-100 млн вольт. Н. Тесла писал в своей автобиографии, что при диаметре сферической емкости C_3 30 футов (9,15 м) ток разряда емкости составляет 2000-4000 А. Башня в лаборатории Лонг Айленд имела высоту 57 м и диаметр сферической емкости 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 емкости 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 $f_0 \geq 6$ 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 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, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ ф/м.

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

Емкость сферической емкости генератора в лаборатории Long Island радиусом 10,3 м равна $C_r = 1,14$ нф.

Емкость сферической емкости 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, $C_0 = 708$ мкф, получим $V_n = 48,8$ В.

Приведенная методика расчета и детальная информация о параметрах резонансного генератора Н. Тесла позволит читателям самостоятельно проектировать резонансные генераторы на 1-50 млн 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. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, № 3, 2006.
7. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот. — М.: Советское Радио, 1957.
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 Analisis of the Extra Coil as a Slow Ware Helical Resonator // Proceedings the 1986 International Tesla Symposium. Colorado Springs, Colorado, International Tesla Society, Inc., 1986. Pp. 2-1 – 2-24.

ФОРУМ ЭЛЕКТРО
 Москва • Санкт-Петербург • Тверь • Ярославль • Нижний Новгород • Самара
КОМПЛЕКСНЫЕ ПОСТАВКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

КАБЕЛЬ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

ПРОИЗВОДСТВА NOVKABEL (СЕРБИЯ)

Марка

NA2XSE2Y, NA2XS2Y

N2XSE2Y, N2XS2Y

NA2XSEY, NA2XSY

N2XSEY, N2XSY

NA2XSF2Y

N2XSF2Y

NA2XSF12Y

N2XSF12Y

Российский аналог

АПаП, АПаПу

ПаП, ПаПу

АПаВ

ПаВ

АПаПв

ПаПв

АПаПв

ПаПв




и также:

N2XSEYRY, NA2XSEYRY бронированный кабель

N2XY неэкранированный, 1 кВ

N2XH с безалюминиевой оболочкой неэкранированный, 1 кВ

Трёхжильный и одножильный
 Качество по стандарту VDE
 Кратчайшие сроки изготовления





(495) 796-96-21 | Центральный офис: г. Москва, Ленинградское ш., д. 18, стр.1
www.forumgroup.ru

Санкт-Петербург (812) 740-75-70 * Нижний Новгород (8312) 74-87-47
 Тверь (4822) 48-01-63 * Ярославль (4852) 44-09-15 * Самара (846) 269-64-09