

УДК 621.35.035

Б.Т. Кононов, А.А. Нечаус

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В статье рассматриваются основные направления совершенствования высоковольтных генераторов импульсных напряжений, приводятся соотношения, позволяющие выбирать параметры индуктивно связанных контуров, включенных во входные и выходные цепи импульсного трансформатора и обеспечивающих получение требуемых амплитуд импульсных напряжений, необходимую скорость их изменения и желаемую форму импульса.

Ключевые слова: генератор импульсных напряжений, импульсный трансформатор, трансформатор Тесла, параметры импульсных напряжений.

Введение

Постановка задачи исследования. Трансформаторы импульсных напряжений, используемые в генераторах импульсных напряжений, являются основными элементами высоковольтных электрофизических установок, определяющими их основные технические характеристики.

Наиболее распространенная схема генератора импульсных напряжений, в состав которого входит импульсный трансформатор, приведена на рис. 1.

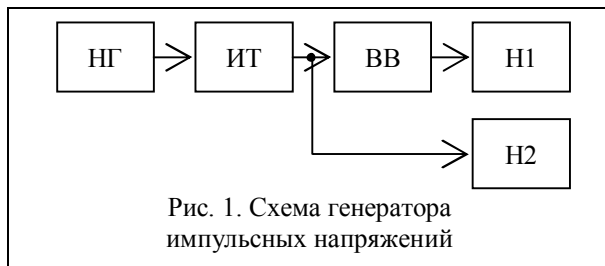


Рис. 1. Схема генератора импульсных напряжений

В состав генератора импульсных напряжений входят:

- низковольтный импульсный генератор НГ,
- повышающий импульсный трансформатор ИТ,
- высоковольтный выпрямитель ВВ
- нагрузка Н1, Н2.

Импульсный трансформатор позволяет изменить амплитуду, форму и полярность импульсов напряжения на своем выходе по сравнению с амплитудой, формой и полярностью импульсов напряжения на своем входе.

Совершенствование работы генераторов импульсных напряжений ведется в следующих направлениях: повышения амплитуды выходного напряжения, увеличения скорости изменения импульсных напряжений, получения требуемой формы напряжения.

Анализ литературы. Импульсные высоковольтные трансформаторы в известной литературе [1 – 3] чаще всего представляют в виде «трансформаторов Тесла». Трансформатор Тесла образован системой двух индуктивно связанных контуров.

Схема трансформатора Тесла приведена на рис. 2.

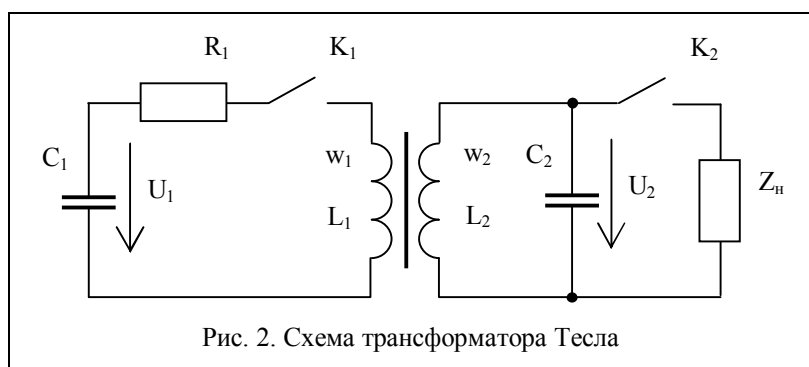


Рис. 2. Схема трансформатора Тесла

Для трансформатора Тесла принято:

$n = \frac{w_1}{w_2}$ – коэффициент трансформации;

C_1, C_2 – емкости первичного и вторичного контуров;

L_1, L_2 – индуктивности первичного и вторичного контура;

R_1 – активное сопротивление цепи первичного контура;

K_1, K_2 – замыкающие ключи первичного и вторичного контура;

Z_n – сопротивление нагрузки.

Характеристики трансформатора Тесла определяются его параметрами R_1, L_1, C_1, L_2, C_2 .

Целью данной статьи является обоснование путей повышения выходного напряжения и увеличения скорости его изменения в высоковольтном импульсном трансформаторе.

Основной материал

Рассмотрим работу высоковольтного трансформатора, в котором в цепи первичной обмотки с числом витков w_1 включено активное сопротивление R_1 и контур L_1, C_1 , а в цепи вторичной обмотки с числом витков w_2 включен контур L_2, C_2 и сопротивление Z_n . В момент пробоя сопротивление нагрузки трансформатора можно принять равным нулю.

В предположении, что напряжения и токи синусоидальны, представим уравнение равновесия напряжений трансформатора следующим образом

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \dot{I}_1 + j \omega M \dot{I}_2; \\ 0 &= R_2 \dot{I}_2 + j \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) \dot{I}_2 + j \omega M \dot{I}_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где M – взаимная индуктивность трансформатора, ω – угловая частота.

Принимая допущение о том, что активным сопротивлением R_2 можно пренебречь, после преобразования системы уравнений (1) получим

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{\omega^2 M^2}{\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}} \right) \dot{I}_1. \quad (2)$$

Исходя из условия резонанса, в соответствие с которым реактивное сопротивление равно нулю, получим из (2) следующее равенство

$$\left(\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} \right) \left(\omega_0 L_2 - \frac{1}{\omega_0 C_2} \right) = \omega_0^2 M^2, \quad (3)$$

где ω_0 – резонансная угловая частота, равная собственной частоте колебаний.

Вводя понятие коэффициента связи контуров $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$, получим следующее уравнение для определения резонансной частоты ω_0

$$\omega_0^4 (1 - K^2) - \omega_0^2 (\omega_1^2 + \omega_2^2) + \omega_1^2 \omega_2^2 = 0, \quad (4)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}}$, $\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}}$ – собственные частоты первого и второго контуров.

Решение (4) представим в виде

$$\begin{aligned} \omega_{0,1,2} &= \\ &= \sqrt{\frac{(\omega_1^2 + \omega_2^2) \pm \sqrt{(\omega_1^2 + \omega_2^2)^2 - 4(1 - K^2)\omega_1^2 \omega_2^2}}{2(1 - K^2)}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Особый интерес представляет случай, когда собственные частоты первого и второго контуров одинаковы, т.е. случай, когда $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$.

Для этого случая уравнение (5) упрощается, и резонансные частоты определяются следующими соотношениями

$$\begin{aligned} \omega_{0,1} &= \omega_0 \sqrt{\frac{1}{1 - K}}; \\ \omega_{0,2} &= \omega_0 \sqrt{\frac{1}{1 + K}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, напряжение на конденсаторе C_2 в момент разряда при отсутствии потерь во вторичном контуре определяется разностью гармонических колебаний

$$\begin{aligned} U_2 &= \frac{U_1}{2} \times \\ &\times \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \left[\cos\left(\frac{\omega_0}{\sqrt{1 - K}} t\right) - \cos\left(\frac{\omega_0}{\sqrt{1 + K}} t\right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) следует, что

$$U_{2\max} = U_1 \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}. \quad (8)$$

Для обеспечения условия (8) требуется, чтобы

$$\cos\left(\frac{\omega_0}{\sqrt{1 - K}} t\right) = -\cos\left(\frac{\omega_0}{\sqrt{1 + K}} t\right) = \pm 1,$$

что имеет место при

$$\omega_0 t = \pi m, \text{ а } \omega_0 t = \pi(m - 1),$$

где $m = 2, 3, 4, \dots$ – порядковый номер.

Очевидно, что отношения $\omega_{0,1}$ и $\omega_{0,2}$ должно определяться следующим выражением

$$\frac{\omega_{0,1}}{\omega_{0,2}} = \frac{m}{m - 1} = \sqrt{\frac{1 + K}{1 - K}}, \quad (9)$$

из которого следует, что коэффициент связи K должен принимать следующие дискретные значения

$$K = \frac{\left(\frac{m}{m - 1}\right)^2 - 1}{\left(\frac{m}{m - 1}\right)^2 + 1}; \quad m \neq 1. \quad (10)$$

При $m = 2, K = 0,6$, увеличение m приводит к снижению величины K .

Для повышения напряжения разряда целесообразно параллельно конденсатору C_2 включить последовательную цепь R_3, C_3 .

Если выполнить условия

$$\begin{aligned} L_2 C_2 &= L_3 C_3; \\ L_3 &> R_2, \end{aligned} \quad (11)$$

то во вторичном контуре возникают колебания с амплитудным значением напряжения, величина которого превышает напряжение на конденсаторе C_3 . Это связано с тем, что в такой схеме разрядной цепи уменьшается ее эквивалентная емкость.

Приведенные соотношения позволяют обосновать рабочую частоту низковольтного генератора, выбрать параметры колебательных контуров и способы повышения выходного напряжения генератора импульсных напряжений.

Форма импульсов, получаемых с выхода генератора импульсных напряжений, определяется моментами срабатывания ключей K_1 и K_2 и зависит от резонансной частоты ω_0 и коэффициента связи контуров K .

Для установления зависимости скорости изменения импульсных напряжений от параметров генератора импульсных напряжений продифференцируем (7).

$$U_2' = \frac{U_1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \times \left(\frac{\omega_0}{\sqrt{1+K}} \sin \frac{\omega_0 t}{\sqrt{1+K}} - \frac{\omega_0}{\sqrt{1-K}} \sin \frac{\omega_0 t}{\sqrt{1-K}} \right). \quad (12)$$

Из (12) следует, что скорость изменения импульсных напряжений определяется собственной частотой колебательных контуров и коэффициентом связи между ними.

Выводы

1. Выходное напряжение генератора импульсных напряжений определяется соотношением между емкостями C_1 и C_2 индуктивно связанных колебательных контуров импульсного трансформатора.

2. Для повышения выходного импульсного напряжения целесообразно параллельно конденсатору C_2 включить последовательную цепь, состоящую из конденсатора C_3 и индуктивности L_3 .

3. Скорость изменения импульсного напряжения и его форма определяются коэффициентом связи контуров, величина которого зависит от коэффициента взаимной индуктивности входного и выходного контуров трансформатора и от собственной частоты этих контуров, которую из условий обеспечения полной передачи энергии следует выбирать одинаковой.

Список литературы

1. Костиков В.Г. Источники электропитания РЭА высокого напряжения / В.Г. Костиков, И.Е. Никитин . – М.: Радио и связь, 1986. – 200 с.
2. Кремнев В.В. Методы умножения и трансформации импульсов в силовой электронике / В.В. Кремнев, Г.А. Месяц . – Новосибирск: Наука, 1987. – 226 с.
3. Смирнов С.М. Генераторы импульсов высокого напряжения / С.М. Смирнов, П.В. Терентьев . – М. – Л.: Энергия, 1964. – 240 с.

Поступила в редколлегию 12.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Чинков, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРІВ ІМПУЛЬСНИХ НАПРУГ

Б.Т. Кононов, А.О. Нечаус

У статті розглядаються основні напрями вдосконалення високовольтних генераторів імпульсних напруг, наводяться співвідношення, що дозволяють вибрати параметри індуктивно зв'язаних контурів, включених у вхідні і вихідні кола імпульсного трансформатора, та забезпечують отримання необхідних амплітуд імпульсних напруг, необхідну швидкість їх зміни і бажану форму імпульсу.

Ключові слова: генератор імпульсних напруг, імпульсний трансформатор, трансформатор Тесла, параметри імпульсних напруг.

CHOICE OF PARAMETERS OF GENERATORS OF IMPULSIVE TENSIONS

B.T. Kononov, A.A. Nechaus

Basic directions of perfection of high-voltages generators of impulsive tensions are considered in the article, correlations over, allowing to choose the parameters of the inductively linked contours, plugged in the entrances and outputs chains of impulsive transformer and required amplitudes of impulsive tensions providing the receipt, necessary speed of their change and desired form of impulse, are brought.

Keywords: generator of impulsive tensions, impulsive transformer, Tesla transformer, parameters of impulsive tensions.