

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРЕБЕНЧАТОЙ КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ С ВСТРОЕННЫМ ЗАРЯДНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2012 г. Ф. Я. Загулов, В. В. Кладухин, С. В. Кладухин,
С. П. Храмцов, В. Ю. Ялов

*Институт электрофизики УрО РАН
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106*

E-mail: laepr@iepr.uran.ru

Поступила в редакцию 01.12.2011 г.

Описан генератор мощных наносекундных импульсов на основе отрезка гребенчатой коаксиальной линии, заряжаемой высоковольтным трансформатором, встроенным в эту линию. Приведены экспериментальные данные по результатам его испытаний. Отмечается перспективность рассматриваемого подхода для уменьшения геометрических размеров генераторов. В эксперименте при формировании импульсов мощностью 2 ГВт достигнуто удлинение формируемого импульса в 1.8 раза по сравнению с обычной коаксиальной формирующей линией той же длины без существенного ухудшения формы формируемого импульса.

ВВЕДЕНИЕ

Отрезки гладких коаксиальных линий нашли широкое применение при формировании мощных наносекундных импульсов прямоугольной формы. При этом для зарядки линий часто используются трансформаторы Тесла [1, 2].

В [3] была предложена конструктивная схема такого генератора, совмещающая коаксиальную формирующую линию с зарядным трансформатором Тесла. Такое конструктивное решение имеет два основных достоинства: уменьшение размеров генератора и отсутствие потерь, связанных с накоплением энергии на конструктивных емкостях элементов трансформатора. Данная схема применяется в генераторах силовых наносекундных импульсов, таких как “Синус” [4], “Радан” [5] и других.

Так как длительность импульса, формируемого генераторами на основе отрезков линий, определяется длиной формирующей линии, то при формировании импульсов длительностью в несколько десятков наносекунд обычно используют решения, обеспечивающие сокращение необходимой длины линии. Основным подходом, направленным на увеличение длительности формируемых импульсов при ограниченной длине линии, является уменьшение скорости распространения волны за счет заполнения линий диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon > 1$. Другим подходом, позволяющим уменьшить скорость распространения волны в линии, является использование замедляющих линий спирального или ребристого типов.

Использование замедляющей линии спирального типа для уменьшения длины генератора было предложено в [6], где спиральная линия используется для удлинения отрезка гладкой коаксиальной линии, в которую встроен зарядный трансформатор. Совмещению зарядного трансформатора со спиральной линией по конструктивной схеме [3] препятствует взаимодействие продольной составляющей магнитного поля распространяющейся в линии осесимметричной ЕН-волны с конической высоковольтной катушкой и магнитопроводом зарядного трансформатора.

В данной работе рассматривается генератор наносекундных импульсов на основе формирующей линии ребристого типа, допускающей ее совмещение с зарядным трансформатором по конструктивной схеме [3].

КОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕРАТОРА

Совмещение трансформатора с гребенчатой формирующей линией основано на отсутствии взаимодействия распространяющихся в такой линии осесимметричных волн Е-типа с конической катушкой вторичного контура зарядного трансформатора и магнитопроводами, расположенными под магнитопрозрачными проводниками формирующей линии. С целью обеспечения прозрачности внешнего и внутреннего проводников формирующей линии для магнитного потока зарядного трансформатора эти проводники выполнены в виде тонких продольных проводов, разделенных диэлектрическими зазорами. Кон-

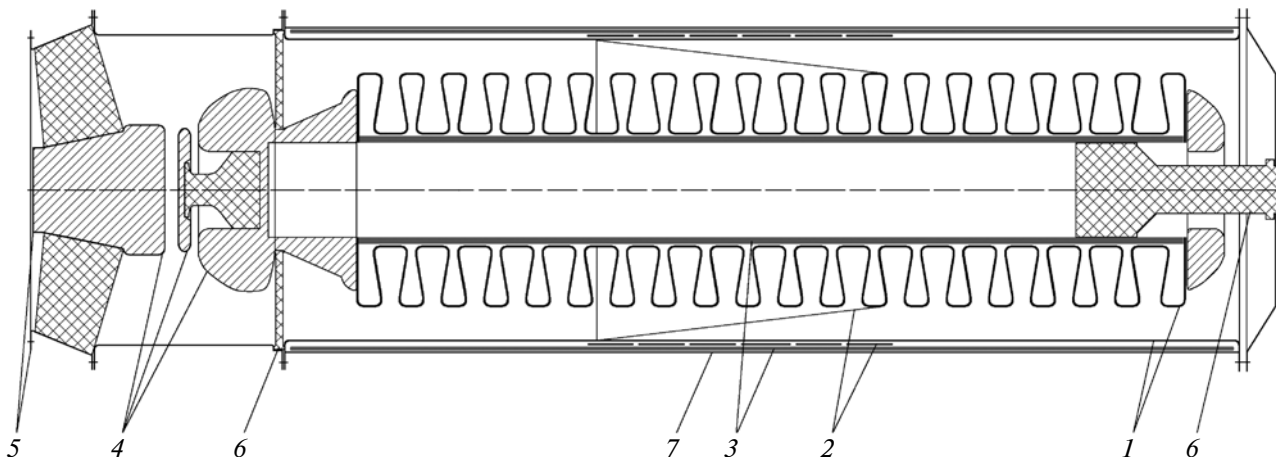


Рис. 1. Конструктивная схема генератора. 1 – формирующая линия; 2 – катушки индуктивности контуров зарядного трансформатора; 3 – внешний и внутренний магнитопроводы трансформатора; 4 – двухзазорный газовый разрядник; 5 – выходной коаксиальный порт; 6 – опорные изоляторы; 7 – корпус.

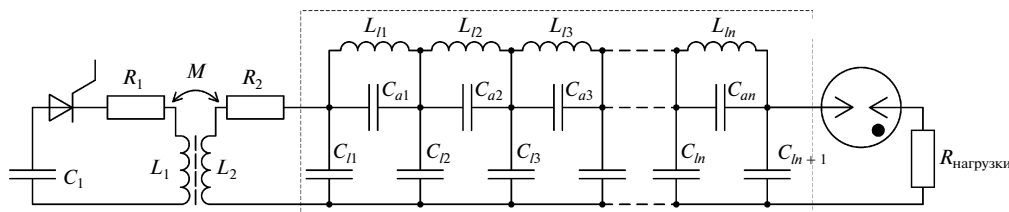


Рис. 2. Эквивалентная схема генератора. C_{li} – емкость секции, L_{li} – индуктивность секции, C_{ai} – межсекционная емкость.

структивная схема генератора на основе гребенчатой коаксиальной линии со встроенным зарядным трансформатором приведена на рис. 1.

При распространении волн в такой линии имеет место продольно-периодическая локализация электрического и магнитного полей, что позволяет рассматривать линию, как однородную периодическую структуру на сосредоточенных элементах, электрическая схема которой представлена на рис. 2, где C_{li} – емкость секции, L_{li} – индуктивность секции, C_{ai} – межсекционная емкость, удовлетворяющие условиям

$$C_{ai} = C_{ai+1} = C_a, \quad i = \overline{1, n-1}; \quad C_{li} = C_{li+1} = C_l, \quad i = \overline{1, n}; \quad L_{li} = L_{li+1} = L_l, \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (1)$$

СВОЙСТВА ФОРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Фазовая скорость распространения гармоник в такой периодической структуре определяется соотношением

$$V_\lambda = \frac{2\pi}{\varphi_\lambda} lc, \quad (2)$$

а дисперсионные свойства периодической структуры определяются соотношением

$$\lambda = \frac{2c\pi\sqrt{L_l C_l}}{2 \sin \frac{\varphi_\lambda}{2}} \sqrt{1 + 4 \frac{C_a}{C_l} \sin^2 \frac{\varphi_\lambda}{2}}, \quad (3)$$

где l – длина секции структуры; λ – длина волны гармоники; V_λ – фазовая скорость гармоники с длиной волны λ ; φ_λ – фазовый сдвиг на одной секции для гармоники с длиной волны λ ; c – скорость света.

Рассматриваемая периодическая структура является фильтром низких частот с полосой пропускания, определяемой фазовым сдвигом $\varphi_\lambda = \pi$, которой соответствует граничная длина волны

$$\lambda_{\min} = c\pi\sqrt{L_l C_l \left(1 + 4 \frac{C_a}{C_l}\right)}. \quad (4)$$

Разброс скоростей парциальных волн, влияющих на фронт и спад импульса, определяется дисперсионным соотношением

$$\beta = \frac{c}{V_\lambda} = \frac{\varphi_\lambda \lambda}{2\pi l} = \frac{2\pi\varphi_\lambda\sqrt{L_l C_l}}{4\pi \sin \frac{\varphi_\lambda}{2}} \sqrt{1 + 4 \frac{C_a}{C_l} \sin^2 \frac{\varphi_\lambda}{2}}, \quad (5)$$

где β – коэффициент замедления.

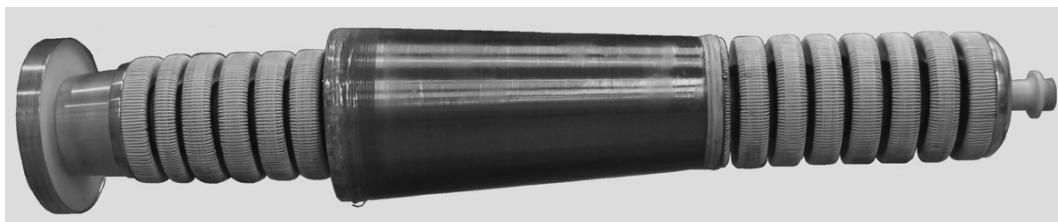


Рис. 3. Центральная часть гребенчатой формирующей линии с вторичной катушкой зарядного трансформатора.

Длительность импульса

$$\tau_{pulse} = \frac{2L}{V_G} \quad (6)$$

определяется групповой скоростью V_G , соответствующей скорости распространения основной части волнового спектра импульса:

$$V_G = \frac{V_\lambda}{1 + \frac{\lambda}{V_\lambda} \frac{dV_\lambda}{d\lambda}} \quad (7)$$

В данном генераторе использована формирующая линия длиной $L \approx 1.3$ м с параметрами: $C_a \approx C_l \approx 10$ пФ, $L_l \approx 10$ нГн, $l \approx 6$ см (рис. 3).

Расчетная дисперсионная характеристика линии приведена на рис. 4. Из приведенной дисперсионной характеристики видно, что в такой линии могут распространяться только волны, удовлетворяющие условию $\lambda > \lambda_{min}$ ($\lambda_{min} \approx 68$ см), причем для волн, удовлетворяющих условию $\lambda > 2\lambda_{min}$, разброс фазовых скоростей незначителен. Таким образом, при разряде линии длиной $L > \lambda_{min}$ групповая скорость может быть определена соотношением $V_G \approx V_{2\lambda_{min}} = \frac{\pi}{\Phi_{2\lambda_{min}} \lambda_{min}} lc \approx 0.55c$,

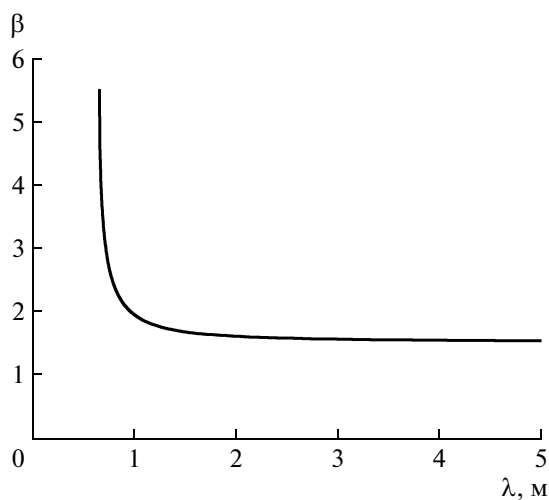


Рис. 4. Дисперсионная характеристика формирующей линии.

что при $L \approx 1.3$ м соответствует длительности импульса $\tau_{pulse} = 2L/V_G \approx 16$ нс.

Амплитуда и форма выходного импульса генератора, полученные путем численного моделирования по его эквивалентной схеме при двух номиналах нагрузки генератора $R_{нагрузки}$ (35 и 45 Ом), приведены на рис. 5, где U_{FL} – напряжение заряда формирующей линии.

ЗАРЯДНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Повышающий зарядный трансформатор, включенный по схеме Тесла, благодаря индуктивности рассеяния обеспечивает резонансный заряд емкостей линии C_{li} от емкости первичного контура C_1 . При этом емкости C_{li} заряжаются равномерно при выполнении условия $2L_2(1-k) \gg \sum_{i=1}^n L_{li}$.

Динамические свойства и эффективность зарядного процесса определяются четырьмя параметрами:

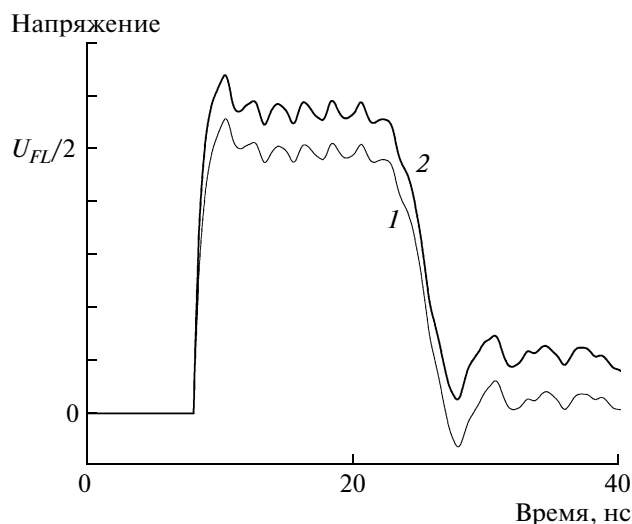


Рис. 5. Выходной импульс (расчет в относительных единицах по напряжению). 1 – $R_{нагрузки} = 35$ Ом, 2 – 45 Ом, U_{FL} – напряжение заряда формирующей линии.

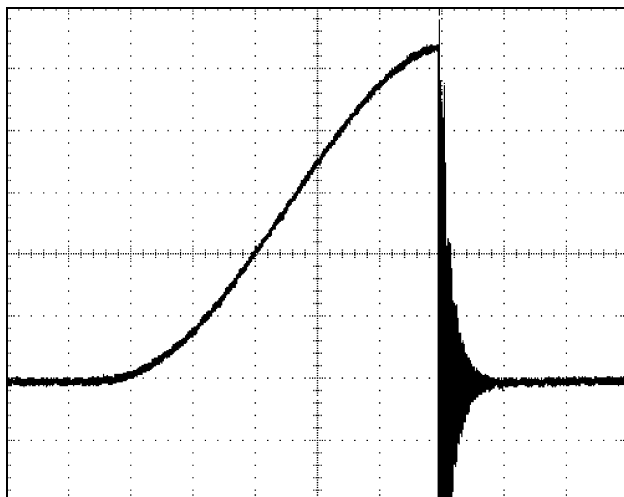


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на формирующей линии. Масштаб по вертикали 100 кВ/деление, по горизонтали – 4 мкс/деление.

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, & Q_2 &= \frac{1}{R_2} \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}, \\ k &= \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, & \alpha &= \sqrt{\frac{L_1 C_1}{L_2 C_2}} \end{aligned} \quad (8)$$

где C_1 – емкость первичного контура; $C_2 = \sum_{i=1}^n C_{li}$ – емкость вторичного контура; L_1 и L_2 – индуктивности катушек трансформатора; R_1 и R_2 – полные сопротивления потерь контуров; Q_1 и Q_2 – добротности контуров; k – коэффициент связи контуров; α – расстройка собственных частот контуров.

Продолжительность зарядного процесса, соответствующая времени достижения первого максимума напряжения на формирующей линии, может быть оценена из соотношения

$$\tau_{ch} \approx 2\pi L_1 (1 - k) \frac{C_1 n^2 C_2}{C_1 + n^2 C_2}, \quad (9)$$

$$\text{где } n = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}.$$

ЭКСПЕРИМЕНТ

Зарядный трансформатор описываемого генератора характеризуется следующими параметрами: $Q_1 \approx 17$, $Q_2 \approx 18$, $k \approx 0.95$, $\alpha \approx 1$. Измерение параметров процесса заряда коаксиальной формирующей линии выполнялось с помощью емкостного делителя, установленного на внешнем токопроводе линии.

Осциллограмма динамики напряжения на формирующей линии в процессе заряда и после срабатывания разрядника приведена на рис. 6. Как видно из осциллограммы, время заряда линии соста-

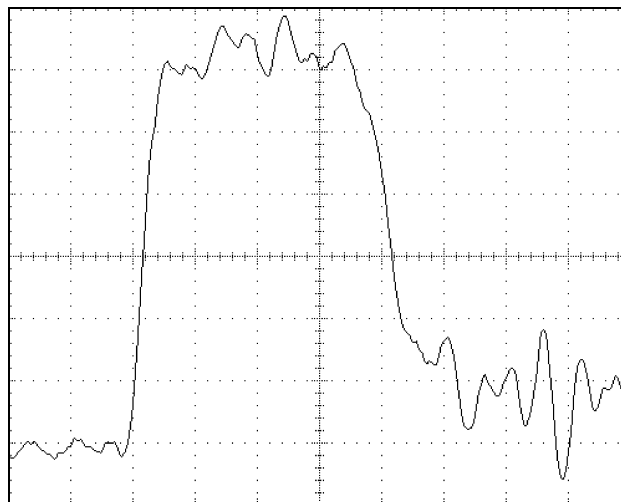


Рис. 7. Осциллограмма выходного импульса. Масштаб по вертикали 49 кВ/деление, по горизонтали – 4 нс/деление.

вило $\tau_{ch} \approx 23$ мкс, при этом коэффициент передачи энергии из емкостного накопителя первичного контура C_1 в емкость формирующей линии C_2 составил $\eta \approx 60\%$. Коэффициент передачи энергии определялся соотношением

$$\eta = \frac{C_2 u_2^2(\tau_{ch})}{C_1 u_1^2(0)}, \quad (10)$$

где $u_2(\tau_{ch})$ – напряжение на формирующей линии в конце процесса заряда; $u_1(0)$ – напряжение на емкостном накопителе первичного контура перед началом заряда.

Амплитуда и форма выходного импульса напряжения регистрировались с помощью емкостного делителя, установленного на входе в маслонаполненную измерительную линию длиной 4 м. Волновое сопротивление измерительной линии составляло 45 Ом. На конце линии был установлен поглотитель импульсов в виде активного, согласованного с линией сопротивления. Форма импульса на входе измерительной линии приведена на рис. 7. Выходная импульсная мощность генератора была равна 2 ГВт, длительность импульса по полувысоте составила $\tau_{pulse} \approx 16$ нс, что соответствует коэффициенту замедления $\beta \approx 1.8$. Фронт и спад импульса соответственно составили $\tau_{fr} \approx 3$ нс, $\tau_{fl} \approx 5$ нс.

ВЫВОДЫ

Использование гребенчатых коаксиальных линий является эффективным способом уменьшения линейных размеров формирователей мощных прямоугольных импульсов, позволяя без существенного ухудшения формы импульса достигнуть коэффициента замедления $\beta \approx 2.5-3$. Встра-

ивание зарядного трансформатора в линию позволяет уменьшить массу и размеры генератора и исключить потери энергии, связанные с зарядкой паразитных емкостей высоковольтных цепей. Сочетание гребенчатых линий с широко используемой масляной изоляцией (диэлектрическая постоянная $\epsilon \approx 2.3$) позволяет увеличить коэффициент замедления до $\beta \approx 4$.

Хорошее соответствие параметров экспериментально измеренного импульса с параметрами импульса, полученного на основе численного расчета, подтверждает правомерность применения эквивалентной схемы генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boscolo, Brautti, Coisson et al.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1975. V. 46. № 11. P. 1535.
2. *Вассерман С.Б.* Трансформатор Тесла в высоковольтных ускорителях заряженных частиц. Препринт ИЯФ. 1977.
3. *Загулов Ф.Я., Борисов В.Я., Власов Г.Я. и др.* // *ПТЭ.* 1976. № 5. С. 18.
4. *Коровин С.Д., Ростов В.В.* // *Изв. вузов. Физика.* 1996. № 12. С. 21.
5. *Яландин М.И., Шпак В.Г.* // *ПТЭ.* 2001. № 3. С. 5.
6. *Губанов В.П., Гунин А.В., Коровин С.Д., Степченко А.С.* // *ПТЭ.* 2002. № 1. С. 73.