



(19) RU⁽¹¹⁾ 2 161 858⁽¹³⁾ C1
(51) МПК⁷ H 03 K 3/53

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

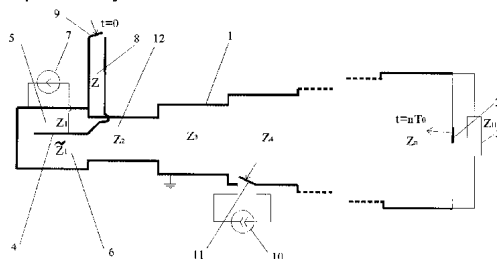
(21), (22) Заявка: 99116884/09, 02.08.1999
(24) Дата начала действия патента: 02.08.1999
(46) Дата публикации: 10.01.2001
(56) Ссылки: RU 2121218 C1, 27.10.1998. RU 2121217 C1, 27.10.1998. RU 2128877 C1, 10.04.1999. US 51380270 A1, 11.08.1992.
(98) Адрес для переписки:
607190, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира 37, РЯЦ-ВНИИЭФ, Начальнику ОПИНТИ Кимачеву А.А. или зам. начальника Волковой Н.А.

(71) Заявитель:
Российский федеральный ядерный центр -
Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики,
Министерство Российской Федерации по
атомной энергии
(72) Изобретатель: Гордеев В.С.,
Мысков Г.А.
(73) Патентообладатель:
Российский федеральный ядерный центр -
Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики,
Министерство Российской Федерации по
атомной энергии

(54) ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

(57) Реферат:
Изобретение относится к области высоковольтной импульсной техники. Техническим результатом является повышение напряжения на выходе генератора при формировании на согласованной резистивной нагрузке с высоким КПД прямоугольного импульса напряжения. Генератор высоковольтных импульсов содержит заземленный электрод, образующий короткозамкнутую ступенчатую линию, выполненную в виде последовательно соединенных отрезков однородных линий с распределенными параметрами одинаковой электрической длины T_0 . Во внутреннем объеме первого отрезка ступенчатой линии размещен высоковольтный электрод, разделяющий этот отрезок на две водородные линии. На выходе СЛ подключены соединенные параллельно нагрузка и прерыватель тока. Между высоковольтным и заземленным электродами включен источник напряжения. В разрыв заземленного электрода в любом месте включены соединенные параллельно источник тока и разрядник. Между высоковольтным и

заземленным электродами в месте соединения первого и второго отрезков ступенчатой линии подключен один из концов дополнительной однородной линии, электрической длина которой равна электрической длине T_0 . На другом конце дополнительной линии включен коммутирующий разрядник. В согласованном режиме, когда генератор в идеальном случае обладает 100%-ным КПД, на нагрузке формируется прямоугольный импульс напряжения с длительностью, равной удвоенному времени пробега электромагнитной волны по длине отдельного отрезка ступенчатой линии. 1 ил.



RU 2 161 858 C1

RU 2 161 858 C1



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 161 858** ⁽¹³⁾ **C1**
 (51) Int. Cl.⁷ **H 03 K 3/53**

RUSSIAN AGENCY
 FOR PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: 99116884/09, 02.08.1999

(24) Effective date for property rights: 02.08.1999

(46) Date of publication: 10.01.2001

(98) Mail address:
 607190, Nizhegorodskaja obl., g. Sarov, pr.
 Mira 37, RFJaTs-VNIIEhF, Nachal'niku OPINTI
 Kimachevu A.A. ili zam. nachal'nika Volkovoj N.A.

(71) Applicant:
 Rossijskij federal'nyj jadernyj tsentr -
 Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij
 institut ehksperimental'noj fiziki,
 Ministerstvo Rossijskoj Federatsii po
 atomnoj ehnergii

(72) Inventor: Gordeev V.S.,
 Myskov G.A.

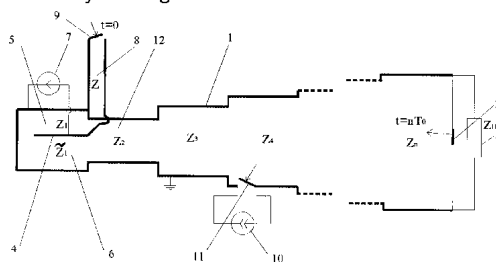
(73) Proprietor:
 Rossijskij federal'nyj jadernyj tsentr -
 Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij
 institut ehksperimental'noj fiziki,
 Ministerstvo Rossijskoj Federatsii po
 atomnoj ehnergii

(54) HIGH-VOLTAGE PULSE GENERATOR

(57) Abstract:

FIELD: high-voltage pulse engineering.
 SUBSTANCE: generator has grounded electrode forming shorted-out stepping line in the form of series-connected sections of homogeneous lines with distributed parameters of equal electric length T_0 . Inner space of first section of stepping line accommodates high-voltage electrode that divides mentioned section into two homogeneous lines. Parallel-connected load and current interrupter are provided at output of stepping line. Voltage supply is inserted between high-voltage and grounded electrodes. Inserted in series with grounded electrode at any point are parallel-connected current supply and switching tube. Additional homogeneous line whose electric length equals T_0 is inserted on one end between high-voltage and grounded electrodes at point of connection of first and second

sections of stepping line. Switching tube is connected on other end of additional line. Under matched conditions when generator efficiency in ideal case is 100%, square pulse is shaped across load its length being equal to double transit time of electromagnetic wave over length of separate section of stepping line. EFFECT: increased output voltage in shaping square pulse across matched resistive load at high efficiency. 1 dwg



RU 2 161 858 C1

RU 2 161 858 C1

Изобретение относится к области высоковольтной импульсной техники и может быть использовано в электрофизических установках для получения мощных высоковольтных импульсов, например, для генерации пучков заряженных частиц (10^5 - 10^7 В, 10^3 - 10^6 А, 10^{-7} - 10^{-8} с).

Известен генератор высоковольтных импульсов /1/, фиг. 3а/, содержащий заземленный электрод, образующий короткозамкнутую ступенчатую линию (СЛ), выполненную в виде последовательно соединенных отрезков однородных линий с распределенными параметрами одинаковой электрической длины T_0 , высоковольтный электрод, размещенный во внутреннем объеме первого отрезка СЛ и разделяющий его на две однородные линии, источник напряжения и коммутирующий разрядник, включенные между высоковольтным и заземленным электродами, причем коммутирующий разрядник размещен в месте соединения первого и второго отрезков СЛ, резистивную нагрузку, подключенную к выходу СЛ последовательно с предимпульсным разрядником. Под действием источника напряжения два отрезка линии вблизи высоковольтного электрода заряжаются до напряжения V_0 , и энергия запасается в генераторе в виде электрического поля. При включении коммутирующего разрядника в результате волновых процессов энергия концентрируется на выходе СЛ. С точки зрения достижения максимального КПД оптимальными являются следующие соотношения волновых сопротивлений

$$Z_i = Z_n \cdot 2 / [(n-i+1)(n-i+2)],$$

где $i = 2, 3, \dots, n$ - номер отрезка СЛ;

n - полное число отрезков линий в СЛ;

Z_i - волновое сопротивление отрезка линии с номером i ;
волновых сопротивлений отрезков, образованных высоковольтным электродом в первом отрезке СЛ:

$$\text{- с разрядником } Z_1 = Z_n \cdot 2 / [(n+1)(n+2)],$$

$$\text{- без разрядника } \tilde{Z}_1 = Z_n \cdot 2 / [n(n+1)].$$

В общем случае на выходе СЛ формируются импульсы напряжения чередующейся полярности длительностью $2T_0$. Рабочим является второй импульс напряжения. Нагрузка подключается при срабатывании предимпульсного разрядника с задержкой на время $(n+1)T_0$ по отношению к моменту включения коммутирующего разрядника, то есть с задержкой на время $2T_0$ по отношению к моменту прихода к выходу генератора первой электромагнитной волны. На согласованной нагрузке $Z_n = Z_n$ формируется одиночный импульс напряжения длительностью $2T_0$, в течение которого вся энергия передается в нагрузку. Напряжение на согласованной нагрузке превышает зарядное в $(n+1)/2$ раз, включение в состав СЛ каждого дополнительного отрезка повышает напряжение в согласованном режиме на величину $V_0/2$.

Недостатком генератора является сравнительно невысокое напряжение на нагрузке, равное $(n+1)V_0/2$ в согласованном режиме и $(n+1)V_0$ в режиме холостого хода.

Кроме того, недостатком является наличие на выходе генератора предимпульсного напряжения перед подключением нагрузки, равного по амплитуде и длительности, но противоположного по полярности напряжению на согласованной нагрузке. Наличие значительного по величине предимпульсного напряжения, что в данном генераторе является необходимым условием высокого КПД, имеет негативные последствия. Во-первых, на выходе генератора необходимо использовать разрядник, к которому предъявляются весьма высокие требования. Он должен выдерживать без пробоя высокое предимпульсное напряжение, а затем в течение относительно короткого рабочего импульса пропустить всю первоначально запасенную в генераторе энергию. Поэтому в ряде случаев предельные выходные параметры генератора определяются возможностями предимпульсного разрядника. Во-вторых, несмотря на разрядник, предимпульсное напряжение из-за наличия паразитных электрических емкостей частично попадает на нагрузку, что в ряде случаев крайне нежелательно. Например, при использовании в качестве нагрузки генератора вакуумного диода для формирования пучков заряженных частиц предимпульсное напряжение приводит к образованию в ускоряющем зазоре плазмы, оказывающей существенное влияние на характеристики диода в течение рабочего импульса и ухудшающей воспроизводимость выходных параметров генератора от импульса к импульсу.

В качестве прототипа выбран генератор /2/, содержащий заземленный электрод, образующий короткозамкнутую ступенчатую линию, выполненную в виде последовательно соединенных отрезков однородных линий с распределенными параметрами одинаковой электрической длины T_0 . На выходе ступенчатой линии подключены параллельно соединенные прерыватель тока и резистивная нагрузка. Во внутреннем объеме первого отрезка ступенчатой линии размещен высоковольтный электрод, разделяющий первый отрезок СЛ на две однородные линии. Между высоковольтным и заземленным электродом включены источник напряжения и коммутирующий разрядник, причем разрядник размещен в месте соединения первого и второго отрезков СЛ. В разрыв заземленного электрода в любом месте включены параллельно соединенные источник тока и разрядник. Волновые сопротивления линий, образованных высоковольтным и заземленным электродами в первом отрезке ступенчатой линии, равны:

$$\text{- с разрядником } Z_1 = Z_n \frac{\alpha(\alpha+1)}{(\alpha+n)},$$

$$\text{- без разрядника } \tilde{Z}_1 = \frac{Z_1}{(\alpha+n-1)},$$

- волновые сопротивления отрезков ступенчатой линии без высоковольтного электрода выбраны из соотношения

$$\frac{Z_i}{Z_n} = \frac{\alpha(\alpha+1)}{(\alpha+n-i)(\alpha+n-i+1)},$$

где $i = 2, 3, \dots, n$ - номер отрезка ступенчатой линии;

n - число отрезков ступенчатой линии;

α - отношение энергии, запасаемой первоначально в генераторе в виде электрического и в виде магнитного поля;

а отношение величины зарядного напряжения к величине начального тока в генераторе выбрано равным

$$V_0/I_0 = Z_1.$$

Под действием источника напряжения осуществляется импульсная зарядка до напряжения V_0 электрической емкости двух отрезков с волновыми сопротивлениями Z_1 и Z_1 . Энергия запасается в указанных отрезках

в виде электрического поля. Одновременно под действием источника тока в первоначально замкнутом контуре, образованном заземленным электродом и прерывателем тока, создается ток I_0 и энергия запасается дополнительно во всем объеме СЛ в виде магнитного поля. Схема генератора, волновые сопротивления, зарядное напряжение и начальный ток подобраны таким образом, что при включении коммутирующего разрядника вся первоначально запасенная энергия концентрируется на выходе генератора. При срабатывании прерывателя тока в момент прихода к нему первой электромагнитной волны от коммутирующего разрядника на согласованной нагрузке формируется одиночный прямоугольный импульс напряжения длительностью $2T_0$, в течение которого энергия полностью передается в нагрузку. Предымпульсное напряжение на нагрузке отсутствует. Напряжение на согласованной нагрузке превышает зарядное в $(\alpha+n)/2\alpha$ раз.

Недостатком прототипа является сравнительно невысокое напряжение на нагрузке, равное $(\alpha+n)V_0/(2\alpha)$ в согласованном режиме и $(\alpha+n)V_0/2$ в режиме холостого хода.

Техническим результатом является повышение напряжения на выходе генератора при формировании на согласованной резистивной нагрузке с высоким КПД прямоугольного импульса напряжения.

Технический результат достигается тем, что в генератор высоковольтных импульсов, содержащий заземленный электрод, образующий короткозамкнутую ступенчатую линию, выполненную в виде последовательно соединенных отрезков однородных линий с распределенными параметрами одинаковой электрической длины T_0 , высоковольтный электрод, размещенный во внутреннем объеме первого отрезка СЛ и разделяющий его на две однородные линии, источник напряжения, включенный между высоковольтным и заземленным электродами, коммутирующий разрядник, подключенные параллельно на выходе СЛ нагрузку и прерыватель тока, включенные в любом месте в разрыв заземленного электрода соединенные параллельно источнику тока и разрядник, снабжен дополнительной однородной линией с электрической длиной, равной электрической длине T_0 , один из концов дополнительной линии подключен между высоковольтным и заземленным электродами в месте соединения первого и второго отрезков ступенчатой линии, коммутирующий разрядник включен на другом

конце дополнительной линии, а волновые сопротивления линий выбраны из соотношений:

$$Z_1 = (2n - 2d - 1),$$

$$Z_1 = \frac{(2n + 2d - 1)}{2(n + d - 1)},$$

$$Z_i = \frac{(2n + 2d - 1)^2}{2(n + d - i + 1)(n + d - i)},$$

где Z_1, Z_1 - волновые сопротивления

линий, образованных высоковольтным и заземленным электродами в первом отрезке ступенчатой линии, причем дополнительная линия подключена к линии с волновым сопротивлением Z_1 ;

Z_i - волновое сопротивление отрезков ступенчатой линии без высоковольтного электрода;

$i = 2, 3, \dots, n$ - номер отрезка ступенчатой линии;

n - число отрезков ступенчатой линии;

Z - волновое сопротивление дополнительной линии;

α - отношение энергии, запасаемой первоначально в генераторе в виде электрического и магнитного поля;

а отношение величины зарядного напряжения к величине начального тока в генераторе выбрано равным

$$V_0/I_0 = Z \cdot (2n + 2\alpha - n) / (2\alpha).$$

Включение в состав генератора дополнительной линии, изменение положения коммутирующего разрядника, а также указанный оптимальный выбор волновых сопротивлений и отношения величины зарядного напряжения к величине начального тока в генераторе в совокупности обеспечивают полную передачу запасенной в генераторе энергии в согласованную нагрузку при формировании на ней прямоугольного импульса напряжения повышенной амплитуды.

На фигуре приведена принципиальная схема предлагаемого генератора высоковольтных импульсов, где 1 - заземленный электрод; 2 - прерыватель тока; 3 - нагрузка; 4 - высоковольтный электрод; 5, 6 - однородные линии, образованные высоковольтным электродом 4 в первом отрезке ступенчатой линии; 7 - источник напряжения; 8 - дополнительная однородная линия; 9 - коммутирующий разрядник; 10 - источник тока; 11 - разрядник для отключения источника тока; 12 - второй отрезок ступенчатой линии.

Генератор содержит заземленный электрод 1, образующий короткозамкнутую ступенчатую линию, выполненную в виде последовательно соединенных отрезков однородных линий с распределенными параметрами одинаковой электрической длины T_0 . На выходе ступенчатой линии подключены параллельно соединенные прерыватель тока 2 и резистивная нагрузка 3. Во внутреннем объеме первого отрезка ступенчатой линии размещен высоковольтный электрод 4, делящий первый отрезок СЛ на две однородные линии 5 и 6 с волновыми сопротивлениями, равными соответственно

Z_1 и \tilde{Z}_1 . Между высоковольтным 4 и

заземленным 1 электродами включены источник напряжения 7, а также, в месте соединения первого и второго отрезков СЛ со стороны линии 5, один из концов дополнительной однородной линии 8, электрическая длина которой равна электрической длине T_0 . На другом конце дополнительной линии 8 включен коммутирующий разрядник 9. В разрыв заземленного электрода 1 в любом месте включены параллельно соединенные источник тока 10 и разрядник 11. Волновые сопротивления линий выбраны из соотношений:

$$\frac{Z_1}{Z} = (2n - 2d - 1),$$

$$\frac{Z_1}{Z} = \frac{(2n + 2d - 1)}{2(n + d - 1)},$$

$$\frac{Z_i}{Z} = \frac{(2n + 2d - 1) Z}{2(n + d - i + 1)(n + d - i)},$$

где Z_1, \tilde{Z}_1 - волновые сопротивления

линий, образованных высоковольтным и заземленным электродами в первом отрезке ступенчатой линии, причем дополнительная линия подключена к линии с волновым сопротивлением Z_1 ;

Z_i - волновое сопротивление отрезков ступенчатой линии без высоковольтного электрода;

$i = 2, 3, \dots, n$ - номер отрезка ступенчатой линии;

n - число отрезков ступенчатой линии;

Z - волновое сопротивление дополнительной линии,

α - отношение энергии, запасаемой первоначально в генераторе в виде электрического и магнитного поля;

a - отношение величины зарядного напряжения к величине начального тока в генераторе выбрано равным

$$V_0/I_0 = Z \cdot (2n + 2\alpha - n) / (2\alpha).$$

Генератор работает следующим образом. Под действием источника напряжения 7 осуществляется импульсная зарядка до напряжения V_0 электрической емкости отрезков 5 и 6 и дополнительной линии 8, в которых энергия запасается в виде электрического поля. Одновременно под действием источника тока 10 в первоначально замкнутом контуре, образованном заземленным электродом 1 и прерывателем тока 2, создается ток I_0 и энергия запасается дополнительно во всем объеме ступенчатой линии в виде магнитного поля. Соотношение величин V_0 и I_0 выбраны в соответствии с указанным выше уравнением. (Полярность напряжения V_0 и направление тока I_0 выбираются таким образом, чтобы после прихода электромагнитной волны от коммутирующего разрядника 9 в линии 5 происходило уменьшение тока). Величины V_0 и I_0 определяются и фиксируются до начала зарядки генератора путем выбора соответствующих источников напряжения или тока, либо путем предварительного регулирования выходных параметров этих источников. При достижении максимального

тока I_0 и максимального зарядного напряжения V_0 включается коммутирующий разрядник 9.

Для дальнейшего анализа волновых процессов этот момент времени удобно обозначить как $t = 0$. (Разрядник 11, отсоединяющий источник тока 10 от ступенчатой линии, включается после достижения максимального тока I_0 до прихода к нему первой электромагнитной волны от коммутирующего разрядника 9, например, в момент времени $t = 0$). При включении коммутирующего разрядника 9 по дополнительной линии 8 будет распространяться волна разрядки $-V_0$, после прохождения которой напряжение в дополнительной линии становится равным нулю. Будем считать полярность напряжения положительной, если вектор напряженности электрического поля на рассматриваемом рисунке направлен в СЛ снизу вверх, а в дополнительной линии справа налево. В момент времени $t = T_0$ эта волна приходит к месту соединения дополнительной линии с линиями 5, 6 и 12. В результате в дополнительную линию 8 отразится волна напряжения $-V_0/2$, а по линиям 5, 6 и 12 будут распространяться волны напряжения $-3V_0/2, V_0 \cdot (n + d - 2) / [2(n + d - 1)]$ и $-V_0 \cdot (2n + 2d - 1) / [2(n + d - 1)]$ соответственно.

В момент времени $t = 2T_0$ происходит следующее. Волна напряжения $-V_0/2$, распространяющаяся по дополнительной линии 8, достигает короткозамкнутого коммутирующего разрядника 9 и отражается от него без изменения амплитуды, но с противоположной полярностью. К месту соединения линий 5 и 6 приходят две волны: $-3V_0/2$ по линии 5 и $V_0 \cdot (n + \alpha - 2) / [2(n + \alpha - 1)]$ по линии 6. В результате суперпозиции волн в месте соединения линий с разными волновыми сопротивлениями по линии 5 в сторону дополнительной линии пойдет волна $V_0/2$, а по линии 6 волна $V_0 \cdot (n + \alpha) / [2(n + \alpha - 1)]$. Легко показать, что после прохождения данных волн напряжение в каждой из этих линий становится равным нулю. Кроме того, в каждой из линий в результате прохождения волн возникает ток, равный по величине, но противоположный по полярности начальному току I_0 , созданному источником 10. Т.е. суммарный ток в обеих линиях становится равным нулю. Таким образом, после прохождения волн из линий 5 и 6 отбирается полностью не только электрическая, но и магнитная энергия. В этот же момент времени волна напряжения $-V_0 \cdot (2n + 2\alpha - 1) / [2(n + \alpha - 1)]$ приходит к месту соединения второго 12 и третьего отрезков СЛ. В результате в линию 12 отразится волна $-V_0 \cdot (2n + 2\alpha - 1) / [2(n + \alpha - 1)(n + \alpha - 2)]$, а в третий отрезок СЛ пойдет волна $-V_0 \cdot (2n + 2\alpha - 1) / [2(n + \alpha - 2)]$.

В момент времени $t = 3T_0$ к месту соединения линий 5, 6, 8 и 12 приходят четыре волны: по линии 5 - волна $V_0/2$, по линии 6 - волна $V_0 \cdot (n + \alpha) / [2(n + \alpha - 1)]$, по линии 8 - волна $V_0/2$ и по линии 12 - волна $-V_0 \cdot (2n + 2d - 1) / [2(n + d - 1)(n + d - 2)]$.

В результате суперпозиции суммарная амплитуда волн напряжения, отраженных и прошедших в линии 5, 6 и 8, равны нулю.

Кроме того, напряжение и полный ток в каждой из указанных линий также становятся равными нулю. Т.е. к моменту времени $t = 3T_0$ завершается процесс полного отбора энергии из линий 5, 6 и 8. В линию 12 в результате суперпозиции пойдет волна напряжения $V_{0 \cdot (2n+2\alpha-1)/(2[n+\alpha-2])}$, обнуляющая в ней как напряжение, так и полный ток. Т.е. начинается процесс полного отбора энергии из этой линии. В этот же момент времени волна $-V_{0 \cdot (2n+2\alpha-1)/(2[n+\alpha-2])}$, распространяющаяся по третьему отрезку СЛ достигает места ее соединения с четвертым отрезком СЛ. В результате в третий отрезок СЛ отразится волна напряжения $-V_{0 \cdot (2n+2\alpha-1)/(2[n+\alpha-2](n+\alpha-3))}$, а в четвертый отрезок СЛ пройдет волна $-V_{0 \cdot (2n+2\alpha-1)/(2[n+\alpha-3])}$.

В момент времени $t = 4T_0$ к месту соединения второго и третьего отрезков СЛ приходят две волны: $V_{0 \cdot (2n+2\alpha-1)/(2[n+\alpha-2])}$ по второму отрезку и $-V_{0 \cdot (2n+2\alpha-1)/(2[n+\alpha-2](n+\alpha-3))}$ по третьему отрезку. Суммарная амплитуда волны, отраженной во второй отрезок, равна нулю, а в третий отрезок СЛ пойдет волна $V_{0 \cdot (2n+2\alpha-1)/(2[n+\alpha-3])}$. К этому моменту времени завершается процесс полного отбора энергии из второго отрезка СЛ. Отбор энергии из остальных отрезков СЛ осуществляется аналогичным образом - первая электромагнитная волна начинает отбор энергии, а завершает этот процесс волна, приходящая со стороны разрядника 9 с задержкой на время $2T_0$. В дальнейшем достаточно рассмотреть распространение по ступенчатой линии только первой электромагнитной волны. В момент времени $t=T_0$ в линию 12 с волновым сопротивлением Z_2 победит волна напряжения $-V_{0 \cdot (2n+2\alpha-1)/(2[n+\alpha-1])}$. При прохождении неоднородностей в местах соединения отрезков ступенчатой линии с разными волновыми сопротивлениями волна будет изменять свою амплитуду. В интервале времени $iT_0 - (i + 1)T_0$ волна будет распространяться по отрезку СЛ с номером i и ее амплитуда V_1^i будет равна

$$V_1^i = -v_0 \frac{(2n+2\alpha-1) \cdot Z_3 \cdot Z_4 \cdot \dots \cdot Z_i}{2^{i-1} (n+\alpha-1) \cdot (Z_2+Z_3) \cdot (Z_3+Z_4) \cdot \dots \cdot (Z_{i-1}+Z_i)}$$

$$= -v_0 \frac{(2n+2\alpha-1) \cdot (\alpha+n-1) \cdot (\alpha+n-2) \cdot \dots \cdot (\alpha+n-i+2)}{2^{i-1} (n+\alpha-1) \cdot (\alpha+n-2) \cdot (\alpha+n-3) \cdot \dots \cdot (\alpha+n-i+1)}$$

$$= -v_0 \frac{(2n+2\alpha-1)}{2^{i-1} (\alpha+n-i+1)}$$

В момент времени $t = nT_0$, когда первая волна

напряжения $V_1^n = -v_0 \frac{(2n+2\alpha-1)}{2(\alpha+1)}$ приходи

т к выходу генератора, включается прерыватель тока 2, подключающий резистивную нагрузку 3 с импедансом Z_H . В результате прихода волны на нагрузке 3 формируется импульс напряжения

а в $V_{H1} = -v_0 \frac{(2n+2\alpha-1)}{(\alpha+1)} \cdot \frac{Z_H}{(Z_n+Z_H)}$,

результате размыкания прерывателя тока - импульс напряжения

5 $V_{H2} = -I_0 \frac{Z_n Z_H}{(Z_n+Z_H)} = -v_0 \frac{(2n+2\alpha-1)}{\alpha(\alpha+1)} \cdot \frac{Z_H}{(Z_n+Z_H)}$.

Суммарная амплитуда импульса напряжения, возникающего на нагрузке 3 в момент времени $t = nT_0$, равна

10 $V_H = V_{H1} + V_{H2} = -v_0 \frac{(2n+2\alpha-1)}{\alpha} \cdot \frac{Z_H}{(Z_n+Z_H)}$

и остается постоянной в интервале времени $nT_0 - (n+2)T_0$. В дальнейшем в общем случае на нагрузке формируется импульс напряжения ступенчатой формы с длительностью ступеней, равной $2T_0$. Генератор имеет наибольший КПД в согласованном режиме, когда $Z_H = Z_n$. В этом случае на нагрузке 3 формируется одиночный прямоугольный импульс напряжения амплитудой $V_0 \cdot (2n+2\alpha-1)/(2\alpha)$ и длительностью $2T_0$. Энергия, переданная в течение импульса в согласованную нагрузку 3

20 равна по $E_H = \frac{V_H^2 \cdot 2T_0}{Z_H} = \frac{V_0^2 T_0}{Z} \cdot \frac{(\alpha+1)}{\alpha}$,

величине энергии, запасенной первоначально в генераторе

30 $E_0 = E_C + E_L = \frac{V_0^2}{2} \cdot (C_1 + \tilde{C}_1) + \frac{I_0^2}{2} \cdot (L_1 + \tilde{L}_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n) =$
 $\frac{V_0^2 T_0}{Z} \left(\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_1} \right) + \frac{I_0^2 T_0}{2} (Z_1 + \tilde{Z}_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n) =$

35 $\frac{V_0^2 T_0}{Z} + I_0^2 T_0 Z + \frac{(2n+2\alpha-1)^2}{4\alpha d} = \frac{V_0^2 T_0}{Z} + \frac{V_0^2 T_0}{\alpha d} = \frac{V_0^2 T_0}{Z} \cdot \frac{(\alpha+1)}{\alpha}$,

где E_C и E_L - энергия, запасаемая в генераторе в электрическом и магнитном поле, соответственно;

40 C, \tilde{C}, L и \tilde{L} - электрическая емкость и индуктивность линий с соответствующими волновыми сопротивлениями.

Следовательно, к моменту времени $t = (n + 2)T_0$ запасенная в генераторе энергия полностью передается в согласованную нагрузку 3, и напряжение и ток в любом сечении генератора становятся равными нулю.

В согласованном режиме, когда генератор в идеальном случае обладает 100%-ным КПД, на нагрузке формируется импульс напряжения прямоугольной формы амплитудой $V_0 \cdot (2n+2\alpha-1)/(2\alpha)$, что превышает напряжение на согласованной нагрузке генератора-прототипа в $2-1/(\alpha + n)$ раз. Например, при $\alpha = 1$ превышение напряжения составляет $2-1/(n+1)$ раз. Так как в рассматриваемом генераторе число отрезков n не может быть выбрано меньше 1, то выигрыш по напряжению составляет не менее 1,5 раз. Выигрыш растет с увеличением числа отрезков СЛ и уменьшением величины α . Оптимальный выбор числа отрезков СЛ и величины α должен проводиться отдельно для каждого конкретного применения.

Правильность метода анализа волновых процессов в высоковольтных генераторах на ступенчатых линиях, подобного проведенному выше, была неоднократно подтверждена при

создании ряда сильноточных импульсных ускорителей электронов с системами формирования импульсов ускоряющего напряжения на ступенчатых линиях /3-7/.

Генератор может быть выполнен в вариантах, использующих полосковые, коаксиальные и радиальные линии с распределенными параметрами.

Источники информации, принятые во внимание:

1. Bossamykin V. S. , Gordeev V. S., Pavlovskii A.I. New schemes for high-voltage pulsed generators based on stepped transmission lines// 9-th International Conference on High-Power Particle Beams, BEAMS-92, Washington, DC, May 25-29, 1992; Springfield, VA, NTIS. 1992. V. I, PP. 511-516 (аналог - стр. 512, fig. 1; прототип - стр. 513, fig. 3a).

2. Патент на изобретение N 2121216. Генератор высоковольтных импульсов// Гордеев В. С., Босамыкин В.С. - N 96112919; Заявлено 20.06.96; Опубликовано 27.10.98., Бюл. N30.

3. Bossamykin V.S., Gordeev V.S., Pavlovskii A.I. et. al. Pulsed power electron accelerator with the forming systems based on stepped transmission lines// 9-th International Conference on High-Power Particle Beams, BEAMS-92, Washington, DC, May 25-29, 1992; Springfield, VA, NTIS. 1992. V. 1, PP. 505-510.

4. Bossamykin V. S. , Gordeev V.S., Pavlovskii A.I. et. al. STRAUS-2 electron pulsed accelerator // 9th IEEE Internat. Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM, June 21-23, 1993; Springfield, VA, NTIS. 1993. V.2. PP. 910-912.

5. Bossamykin V. S. , Gordeev V.S., Pavlovskii A.I. et. al. Linear induction accelerator LIA-10M// 9th IEEE Internat. Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM, June 21-23, 1993; Springfield, VA, NTIS. 1993. V.2. PP. 905-907.

6. В. С. Босамыкин, В. С. Гордеев, В.Ф. Басманов, В.О. Филиппов, Г.А. Мысков и др. Линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ-10М с индукторами на ступенчатых линиях // ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования. -1997. - Вып. 4, 5 (31, 32). С. 117-119.

7. В.С. Босамыкин, В.С. Гордеев, В.Ф. Басманов, В.О. Филиппов, Г.А. Мысков и др. Инжектор ускорителя ЛИУ-10М // ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования. -1997. -Вып. 4, 5 (31, 32). С. 120-122.

Формула изобретения:

Генератор высоковольтных импульсов,

содержащий заземленный электрод, образующий короткозамкнутую ступенчатую линию, выполненную в виде последовательно соединенных отрезков однородных линий с распределенными параметрами с одинаковым временем задержки T_0 , высоковольтный электрод, размещенный во внутреннем объеме первого отрезка ступенчатой линии и разделяющий его на две однородные линии с волновыми сопротивлениями

Z_1 и \tilde{Z}_1 , источник напряжения, включенный

между высоковольтным и заземленным электродами, коммутирующий разрядник, подключенные параллельно на выходе ступенчатой линии нагрузку и прерыватель тока, включенные в любом месте в разрыв заземленного электрода соединенные параллельно источник тока и разрядник, отличающийся тем, что он снабжен дополнительной однородной линией с временем задержки T_0 , один из концов дополнительной однородной линии подключен к концу однородной линии с волновыми сопротивлениями Z_1 между высоковольтным и заземленным электродами в месте соединения первого и второго отрезков ступенчатой линии, коммутирующий разрядник включен на другом конце дополнительной однородной линии, волновые сопротивления линий выбраны из соотношений:

$$\frac{Z_1}{Z} = (2n - 2i - 1),$$

$$\frac{\tilde{Z}_1}{Z} = \frac{(2n + 2i - 1)}{Z(n + i - 1)},$$

$$\frac{Z_i}{Z} = \frac{(2n + 2i - 1) Z}{Z(n + i - 1)(n + i)},$$

где Z_1 - волновое сопротивление отрезков ступенчатой линии без высоковольтного электрода;

$i = 3, 4 \dots, n$ - номер отрезка ступенчатой линии;

n - число отрезков ступенчатой линии;

Z - волновое сопротивление дополнительной однородной линии,

α - отношение энергии, запасаемой первоначально в генераторе в виде электрического и магнитного поля;

а отношение величины зарядного напряжения к величине начального тока в генераторе выбрано равным $V_0/I_0 = Z \cdot (2n + 2\alpha - n) / (2\alpha)$.