

УДК 537.86, 621.319.53
DOI: 10.15372/PMTF202315409

СПИРАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ С РАЗДЕЛЕННЫМИ В ПРОСТРАНСТВЕ ИНДУКТИВНОЙ И ЕМКОСТНОЙ ЧАСТЯМИ

Е. И. Пальчиков*,**, А. М. Рябчун*,**, А. Г. Паракун*,**

* Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

** Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Новосибирск, Россия

E-mails: palchikov@hydro.nsc.ru, ryabchun@hydro.nsc.ru, paraskun.a.g@hydro.nsc.ru

Предложены новые модификации спиральных генераторов с профилированными полосковыми линиями в форме меандра, что позволяет разделить в пространстве индуктивную и емкостную части генератора. Предложенное изменение допускает раздельное регулирование волнового сопротивления двухшинной спиральной линии, индуктивности и емкости намотки генератора. Экспериментально исследуются характеристики генераторов, предлагаются теоретические модели, адекватно описывающие работу данных устройств. Разработанные генераторы предлагаются использовать для создания импульсных рентгеновских аппаратов с взрывной эмиссией электронов.

Ключевые слова: спиральный генератор, высокое напряжение, генератор наносекундных импульсов, импульсный рентгеновский аппарат

Введение. В данной работе рассматриваются новые модификации спиральных генераторов, предложенных Р. А. Фитчем и В. Т. С. Хаузеллом [1, 2], а также Н. В. Белкиным и А. Я. Жарковой [3]. Данные генераторы являются наиболее простыми устройствами, которые запасают электрическую энергию при относительно низком напряжении, а разряжают ее в виде короткого электрического импульса с высоким напряжением. Устройства состоят из двух деталей: спиральной двухшинной линии и разрядника (ключа), что позволяет применять их для создания портативной импульсной высоковольтной техники. Разновидности указанных генераторов показаны на рис. 1.

1. Постановка задачи. Конструкция спирального генератора содержит индуктивность спиральной линии, соединенную параллельно с выходом генератора. При срабатывании генератора, в процессе нарастания напряжения на нагрузке, часть выходного тока ответвляется на эту индуктивность, что приводит к уменьшению КПД и рабочего напряжения генератора. Для достижения высокого КПД необходимо малое отношение толщины намотки двухшинной линии $2Nd$ к диаметру генератора D (N — число витков; d — толщина одного слоя изоляции и шины). В то же время, зафиксировав D , невозможно бесконечно уменьшать толщину намотки, поскольку обмотка должна выдерживать выходное импульсное напряжение генератора и статическое напряжение зарядки длинных полосковых линий, составляющих генератор. Увеличивать диаметр D нерационально, так как при

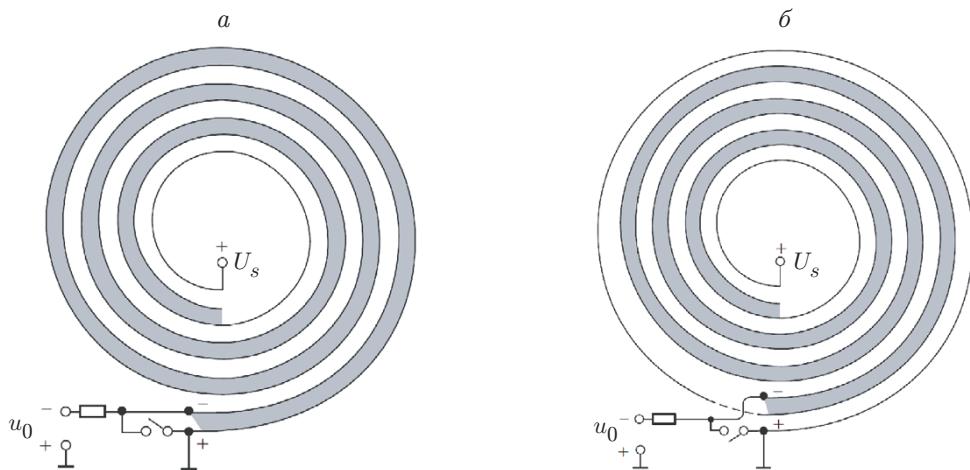


Рис. 1. Электрические схемы генератора Фитча — Хауэлла (а) и модифицированного генератора Белкина — Жарковой с одним дополнительным витком (б)

этом увеличивается размер всего устройства. КПД генератора можно увеличить, а диаметр уменьшить, если внутри него и снаружи поместить ферромагнитный сердечник. Тогда габариты и масса генератора будут увеличиваться вследствие наличия сердечника.

Выходная цепь генератора имеет такую топологию, что ток нагрузки должен один раз обходить вокруг сердечника. Это приводит к увеличению выходной индуктивности генератора и ограничению силы тока на нагрузку, особенно при наличии ферромагнитного сердечника. В результате эффективность работы генератора уменьшается по сравнению с другими источниками импульсов.

Недостатком спиральных генераторов является сильная зависимость их КПД от характеристик разрядника (времени включения, индуктивности и внутреннего сопротивления). Для того чтобы линия генератора работала как длинная полосковая линия с бегущей волной, а не как колебательный контур, состоящий из емкости линии и индуктивности разрядника, импеданс и время срабатывания разрядника должны быть много меньше импеданса и времени прохождения сигнала по полосковой линии. Это условие противоречит требованию малости толщины намотки для увеличения КПД. При малых $2Nd$ и реальной ширине линии, необходимой для создания емкости генератора, волновое сопротивление двухшинной линии уменьшается, что, в свою очередь, требует характеристик разрядника, как правило, не достижимых на практике.

Таким образом, для повышения КПД и стабильности работы генератора импеданс и время прохождения сигнала по полосковой линии должны быть много больше импеданса и времени срабатывания ключа (разрядника). Однако волновое сопротивление двухшинной спиральной линии, индуктивность намотки генератора, выходная емкость, выходная индуктивность жестко связаны между собой и их раздельное регулирование невозможно.

Для решения отмеченных проблем предлагается профилировать длинную линию спирального генератора [4]. На двухшинной линии выполняются вырезы в форме меандра, которые разделяют в пространстве индуктивную и емкостную части генератора вдоль оси намотки (рис. 2). Внутри и снаружи индуктивной части можно расположить ферритовые сердечники. Несмотря на то что магнитопровод разорван слоем изоляции, большая площадь выступающих элементов магнитопровода позволяет увеличить индуктивность намотки всего генератора. Тем не менее индуктивности внутри двухшинной линии остаются не зависящими от магнитопроводов и задаются толщиной слоя изоляции между шинами и шириной шины. Емкость определяется площадью емкостной части. Волновое сопротив-

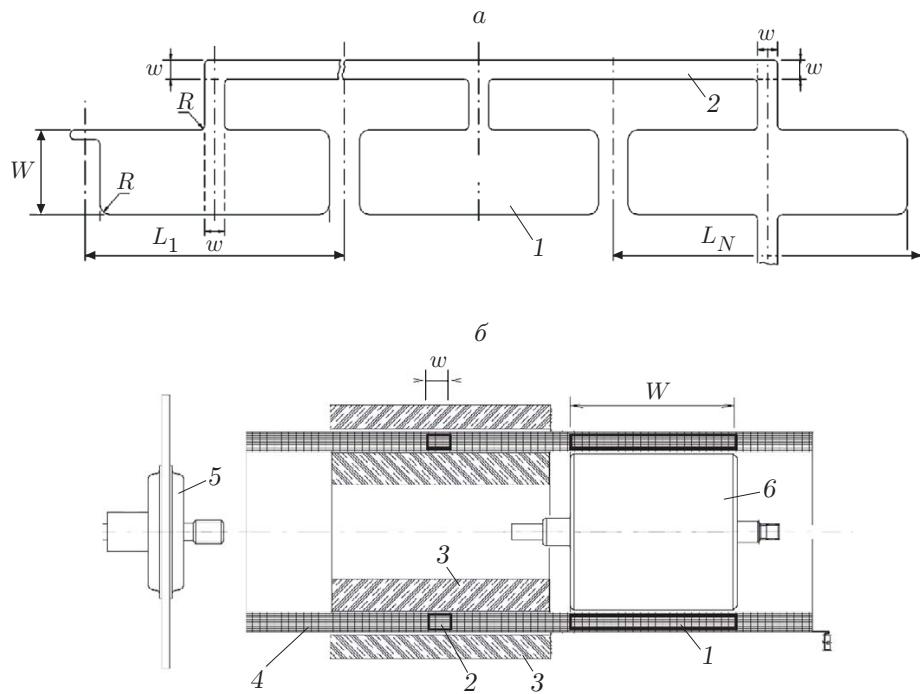


Рис. 2. Схемы модифицированного генератора:

а — форма проводников двухшинной линии, *б* — осевое сечение генератора; 1 — емкостная часть, 2 — индуктивная часть, 3 — ферритовые сердечники, 4 — изоляция (лавсан), 5 — разрядник генератора, 6 — разрядник-обостритель на нагрузку

ление пропорционально корню квадратному из отношения ширины емкостной части W к ширине индуктивной части w и может регулироваться независимо от этого отношения (см. рис. 2). Внутрь емкостной части может быть вставлен проводящий замкнутый цилиндр, вытесняющий магнитное поле (на рис. 2 это корпус разрядника-обострителя, соединенного с выходом генератора). Заряд из емкости перетекает в нагрузку по фактически безиндуктивной цепи.

2. Параметры разработанного генератора. Изготовлены и исследованы генераторы двух видов: классический спиральный генератор (11+12 витков) и модифицированный генератор Белкина с дополнительным витком (11+13 витков), схемы которых представлены на рис. 1.

Генераторы имеют следующие размеры: длина по изоляции — 180 мм, внешний диаметр — 65 мм, внутренний диаметр — 40,5 мм. Толщина намотки равна 5 мм. Изоляция намотки рассчитана на напряжение 100 кВ. Проводящие шины в форме меандра (см. рис. 2) получены химическим травлением фольгированного лавсана. В генераторе используются диэлектрические магнитопроводы из феррита ВНП-200. Входная емкость генераторов равна $C_{in} = 19,5$ нФ, выходная емкость — $C_{out} = 40$ пФ. Индуктивность спирали без магнитопровода составляет 7,7 мкГн, с ферритами — 36 мкГн. Время нарастания напряжения импульса от нуля до максимального значения равно 55 нс. КПД генераторов составляет $\eta \approx 27 \div 29 \%$, добротность $Q = 5$. Полученные коэффициенты трансформации равны $k = 11,0 \div 12,5$, что при зарядке двухшинной линии до напряжения $U_{in} = 10$ кВ позволяет создать импульсный рентгеновский аппарат, рассчитанный на рабочее напряжение не менее $U_{out} = 100$ кВ.

Модифицированный генератор и магнитопроводы представлены на рис. 3.



Рис. 3. Модифицированный генератор (а) и магнитопроводы (б)

Можно получить оценку времени нарастания напряжения в спиральном генераторе до максимального значения. В рассматриваемом случае при длине непрофилированной спиральной линии $l = 1,5$ м время прохождения волны вдоль нее в прямом и обратном направлениях составляет $(2l/c)\sqrt{\varepsilon} = (3/(3 \cdot 10^8))\sqrt{3,2} = 17,9 \cdot 10^{-9}$ с ≈ 18 нс (l — длина линии; $\varepsilon \approx 3,2$ — диэлектрическая проницаемость лавсана; c — скорость света).

Профилирование в форме меандра приводит к увеличению волнового сопротивления, так как изменяется отношение удельной индуктивности линии к ее удельной емкости. Однако профилирование приводит также к увеличению времени распространения волны по образовавшейся линии задержки, которое пропорционально корню квадратному из произведения удельной индуктивности и удельной емкости. В данном случае индуктивность увеличилась по отношению к емкости в 10 раз ($W/w \approx 50$ мм/5 мм = 10). Скорость волны уменьшилась в $\sqrt{10}$ раз. Во столько же раз увеличилось время прохождения: 18 нс $\cdot 3,16 = 56,9$ нс. В эксперименте получено значение 55 нс, близкое к теоретической оценке.

В данной работе не рассматривается вариант замыкания генератора в середине спирали [5], несмотря на то что такой генератор может иметь больший КПД [6, 7]. В этом случае замыкающий разрядник в процессе работы оказывается под напряжением, равным половине выходного напряжения генератора, что затрудняет запуск генератора и синхронизацию выходного импульса с исследуемыми процессами. Синхронный запуск важен при использовании генератора в импульсном рентгеновском аппарате для регистрации быстропротекающих однократных процессов. По той же причине рассматриваются рабочие параметры генераторов только на первой полуволне колебаний.

В таблице приведены измеренные значения коэффициентов трансформации k и КПД η спирального генератора и генератора с дополнительным витком. КПД вычислялся по формуле $\eta = C_{out}U_{out}^2/(C_{in}U_{in}^2)$. При одном и том же значении коэффициента трансформации большее значение КПД генератора с дополнительным витком обусловлено незначительным различием входных и выходных емкостей для разных типов сборки.

По величине КПД генераторы не уступают системам на основе трансформатора Тесла (20–30 % на первой полуволне). При этом габариты устройств, а также количество деталей существенно меньше.

3. Теоретическая модель. В модели, на основе которой получены теоретические зависимости выходного напряжения спиральных генераторов от времени [7, 8], в отличие

Коэффициент трансформации k и КПД спирального генератора и генератора с дополнительным витком

Положение ферритового сердечника	Спиральный генератор		Генератор с дополнительным витком	
	k	$\eta, \%$	k	$\eta, \%$
—	7,5	10,4	8,0	12,8
Внутри генератора	10,4	23,4	10,5	22,0
Внутри и снаружи генератора	12,0	26,9	12,0	28,8

от моделей, предложенных в работах [2, 9, 10], учитывается влияние волны, распространяющейся по пассивной линии. Распространение волны в активной и пассивной линиях описывается телеграфным уравнением, а процесс стекания заряда описан в рамках модели классического колебательного контура. Данная модель более точно описывает процессы, происходящие при работе спирального генератора. Кроме того, полученная в рамках этой модели система уравнений учитывает различные поправки, что делает ее наиболее подходящей для расчета параметров спирального генератора.

Уравнения, описывающие распространение электромагнитной волны в активной и пассивной линиях спирального генератора, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_a}{\partial t} &= -\frac{\partial i_a}{\partial x} - Ni_s, & \frac{\partial u_p}{\partial t} &= -\frac{\partial i_p}{\partial x} - Ni_s, \\ \frac{\partial i_a}{\partial t} &= -\frac{\partial u_a}{\partial x}, & \frac{\partial i_p}{\partial t} &= -\frac{\partial u_p}{\partial x}, \\ u_s &= N \int_0^1 (u_a + u_p) dx. \end{aligned}$$

Границные условия, соответствующие наиболее реалистичной модели, записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} N^2 \frac{di_s}{dt} - k_{sp}(n+1)N \frac{di_{0p}}{dt} + k_{sa}nN \frac{di_{0a}}{dt} &= \frac{\omega_0^2}{2} u_s, \\ -k_{sa}Nn \frac{di_s}{dt} + (L_z + k_{ap}n(n+1)) \frac{di_{0p}}{dt} - (L_z + n^2) \frac{di_{0a}}{dt} &= \frac{\omega_0^2}{2} u_a(0), \\ -k_{sp}N(n+1) \frac{di_s}{dt} - (L_z + (n+1)^2) \frac{di_{0p}}{dt} + (L_z + k_{ap}n(n+1)) \frac{di_{0a}}{dt} &= \frac{\omega_0^2}{2} u_p(0). \end{aligned}$$

Здесь k_{ap} , k_{sp} , k_{sa} — коэффициенты связи между контурами, которые замыкают активную и пассивную линии, пассивную линию и спираль, спираль и активную линию соответственно; n — количество дополнительных внешних витков; u_a , i_a — напряжение и сила тока в активной линии; u_p , i_p — напряжение и сила тока в пассивной линии; ω_0 — собственная частота генератора с учетом индуктивности спирали и выходной емкости генератора; L_z — индуктивность ключа; i_s — сила тока, стекающего по спирали [7].

На рис. 4 приведены экспериментальные осциллограммы и расчетные зависимости выходного напряжения от времени для классического спирального генератора и генератора с дополнительным витком при наличии в обоих генераторах ферритового магнитопровода. На рис. 4, б, г значению напряжения $U = 1$ соответствует КПД $\eta = 100\%$. Видно, что результаты моделирования по предложенным теоретическим моделям хорошо согласуются с экспериментальными данными.

У генератора с дополнительным витком практически отсутствует вторая полуволна колебаний (см. рис. 4, б, г), что стабилизирует работу на нагрузку в виде последовательно включенного разрядника и рентгеновской трубки с взрывной эмиссией, шунтированной

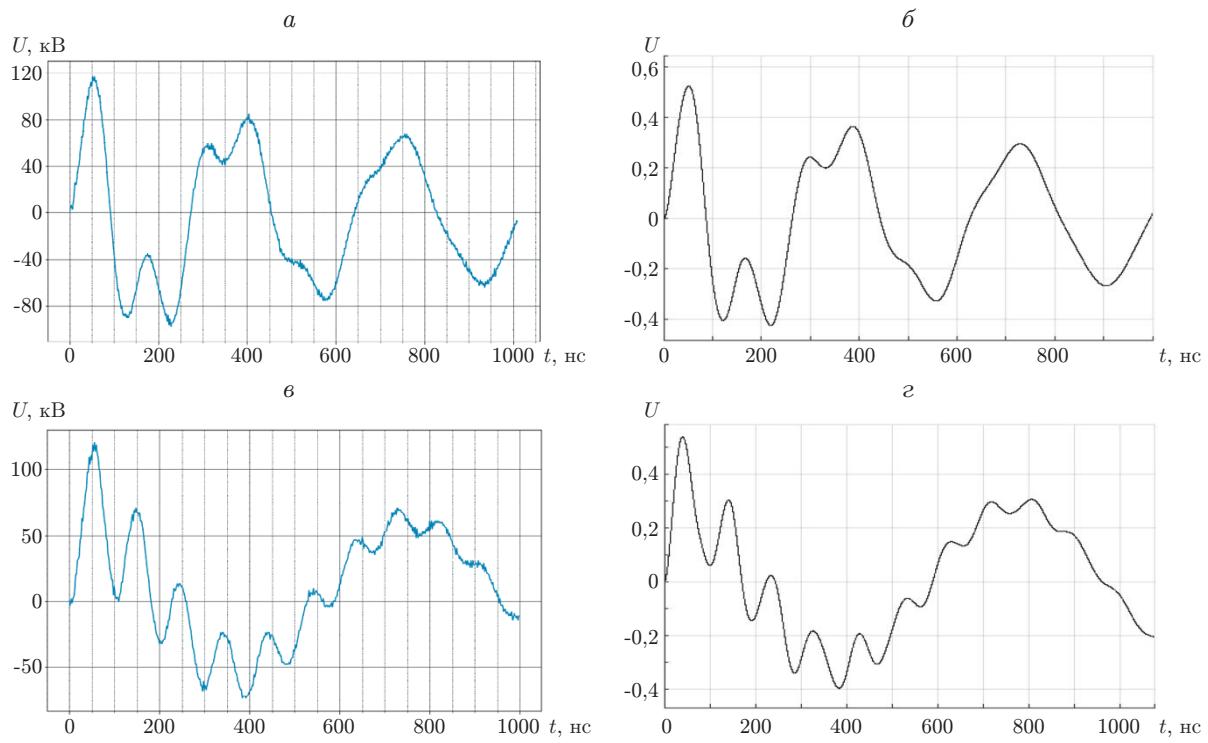


Рис. 4. Экспериментальные (а, в) и теоретические (б, г) зависимости выходного напряжения от времени:
а, б — спиральный генератор, в, г — спиральный генератор с дополнительным витком

индуктивностью. Исключены нештатные ситуации, при которых анод и катод меняются местами, доза рентгеновского излучения близка к нулевой, а фокус имеет размер катода. Следует отметить, что для спирального генератора амплитуда второй полуволны меньше амплитуды первой полуволны (см. рис. 4, а, б).

4. Рентгеновский аппарат на основе спирального генератора. На основе разработанного генератора (см. рис. 1, а) с узлами, показанными на рис. 2, был создан портативный импульсный рентгеновский аппарат ИРИС-100. Электрическая схема аппарата показана на рис. 5, а. Линия спирального генератора заряжается до напряжения, равного 10 кВ. Управляемый разрядник S_1 типа РУ-62 по синхросигналу запускает генератор. При достижении на выходе генератора напряжения, равного 100 кВ, заполненный водородом разрядник-обостритель S_2 типа Р-48 за время менее 1 нс соединяет выход генератора с нагрузкой — диодной импульсной рентгеновской трубкой с взрывной эмиссией X_1 типа ИМА6-Д. Параллельно трубке включена индуктивность для исключения конкуренции разрядных промежутков разрядника S_2 и трубы X_1 при пробое S_2 . Внешний вид аппарата показан на рис. 5, б.

Объем, занимаемый спиральным генератором с рентгеновской трубкой, составляет приблизительно 1/3 объема аппарата. Остальной объем занимают аккумулятор и электронный блок зарядки (управления).

Заключение. Разработаны и созданы спиральные генераторы с профилированными в виде меандра шинами и разделенными в пространстве индуктивной и емкостной частями. Данное конструктивное решение позволяет независимо регулировать волновое сопротивление двухшинной спиральной линии, индуктивность намотки генератора, выходную емкость и выходную индуктивность, время выхода на максимум напряжения.

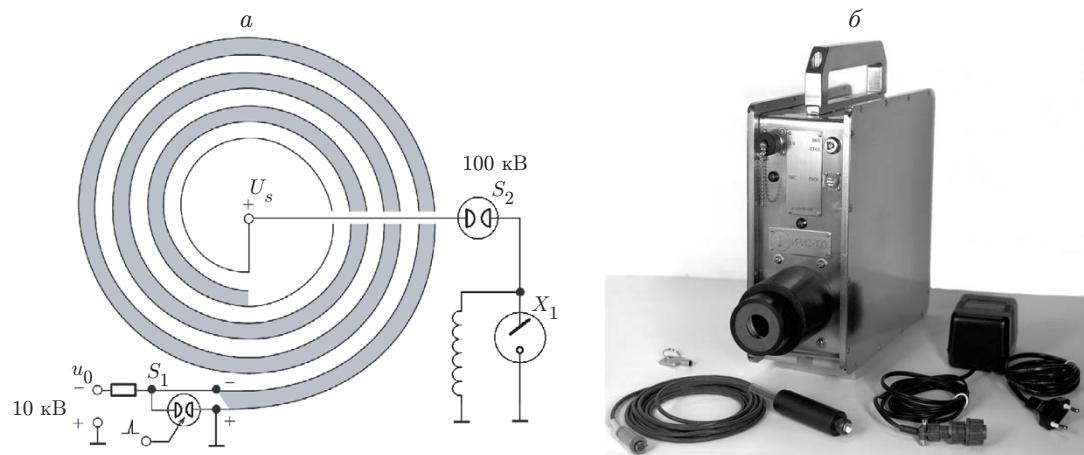


Рис. 5. Электрическая схема (а) и внешний вид (б) импульсного рентгеновского аппарата

Экспериментально измерены выходные характеристики генераторов для различных конфигураций магнитопровода и разных вариантов спиральных генераторов. Установлено, что при размещении ферритовых магнитопроводов внутри и снаружи индуктивной части генератора коэффициент трансформации увеличивается в 1,5 \div 1,6 раза, КПД генераторов — в 2,2 \div 2,6 раза.

Показано, что предложенные ранее теоретические модели применимы для различных модификаций генераторов с разделенными в пространстве индуктивной и емкостной частями. Результаты расчетов по теоретическим моделям хорошо согласуются с экспериментальными данными, однако для проведения более точных инженерных расчетов требуется доработка моделей.

Генераторы могут быть использованы для получения синхронизированных во времени наносекундных импульсов с высоким напряжением и создания импульсных рентгеновских аппаратов с взрывной эмиссией, что необходимо для исследования быстропротекающих процессов.

По значению КПД модифицированные генераторы не уступают системам, основанным на трансформаторе Тесла, при этом они более компактны и содержат меньше деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pat. 975911 GB, Н 03 к. Improvements in or relating to pulse generators / R. A. Fitch, V. T. S. Howell. Appl. N 18136/61, 18.05.1961; Publ. 25.11.1964.
2. Fitch R. A., Howell V. T. S. Novel principle of transient high-voltage generation // Proc. IEE. 1964. V. 111. P. 849–855.
3. А. с. 149494 СССР, Класс 21 д 2, 49. Импульсный трансформатор / Н. В. Белкин, А. Я. Жаркова. № 744249/26-9; Заявл. 06.09.1961; Опубл. 01.01.1962, Бюл. № 16.
4. Заявка 2021120420 А, МПК Н 05 G 1/24. Спиральный генератор высоковольтных импульсов / Е. И. Пальчиков. Заявл. 09.07.2021; Опубл. 09.01.2023, Бюл. № 1. https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWA/000/002/021/120/420/A_20230109_2021120420/document.pdf.
5. Pat. 5442677 US, IC⁶ Н 05 G 1/06. Cold-cathode x-ray emitter and tube therefor / J. Golden, P. Golden. Publ. 15.08.1995.

6. Palchikov E. I., Krasnikov I. Yu., Ryabchun A. M. Simple source of high-voltage pulse for barrier discharge // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, вып. 12/3. С. 5–9.
7. Пальчиков Е. И., Рябчун А. М., Красников И. Ю. Модифицированный спиральный генератор высоких напряжений для питания импульсного рентгеновского аппарата // Журн. техн. физики. 2012. Т. 82, вып. 2. С. 136–146.
8. Биченков Е. И., Башкатов Т. Ю., Пальчиков Е. И., Рябчун А. М. Об уточнении теоретической модели для спирального генератора высоких напряжений // Журн. техн. физики. 2007. Т. 77, вып. 12. С. 66–72.
9. Месяц Г. А. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения / Г. А. Месяц, А. С. Насибов, В. В. Кремнев. М.: Энергия, 1970. С. 70–73.
10. Рюль Ф., Герцигер Дж. Анализ спирального генератора // Приборы для науч. исслед. 1980. № 11. С. 103–110.

*Поступила в редакцию 10/X 2023 г.,
после доработки — 13/XI 2023 г.
Принята к публикации 27/XI 2023 г.*
