

УДК 621.386.1, 621.373, 621.314.21

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ АППАРАТ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО СПИРАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Е. И. Пальчиков^{*,**}, А. В. Долгих^{*,**}, В. В. Клыпин^{*,**},
А. М. Рябчун^{*,**}, М. С. Самойленко^{*}

* Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

** Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

E-mails: palchikov@hydro.nsc.ru, magnak@mail.ru, klipvlad@gmail.com,
ryabchun@hydro.nsc.ru, saguru@inbox.ru

Изготовлен и испытан прототип импульсного рентгеновского аппарата с рабочим напряжением $600 \div 800$ кВ на основе комбинированного спирального генератора. За счет добавления одношинной линии, отсутствующей в классическом спиральном генераторе, увеличена общая длина спиральной обмотки, что позволяет согласовать время прохождения волны по линии спирального генератора с периодом колебаний в генераторе с трансформатором Тесла. Показано, что предлагаемый трансформатор имеет высокий коэффициент полезного действия. Предложена теоретическая модель, описывающая работу комбинированного генератора.

Ключевые слова: спиральный генератор, импульсный рентгеновский аппарат, источник высоковольтных импульсов.

DOI: 10.15372/PMTF20190322

Введение. Импульсные рентгеновские аппараты (ИРА) на основе спиральных волноводных структур (спирального генератора, трансформатора Белкина, комбинированного генератора) более просты в изготовлении по сравнению с генераторами других типов. Высоковольтная часть ИРА состоит из трех элементов: спиральной структуры, разрядника на входе и рентгеновской трубки на выходе. Такой генератор, имеющий коэффициент полезного действия (КПД), сравнимый с КПД трансформатора Тесла, отличается более простой конструкцией и высокой надежностью. В настоящее время область применения ИРА такого типа ограничена, что обусловлено сложностью и неточностью теоретических моделей, используемых для прогнозирования свойств генераторов и проведения инженерных расчетов.

Спиральный генератор (СГ), схема которого приведена на рис. 1, *a*, представляет собой длинную двухшинную линию, свернутую в спираль [1] и выполняющую функции первичного емкостного накопителя, повышающего трансформатора, вторичного емкостного накопителя, согласующей линии. Все параметры спирального генератора жестко связаны между собой и изменение одного из них приводит к изменению других.

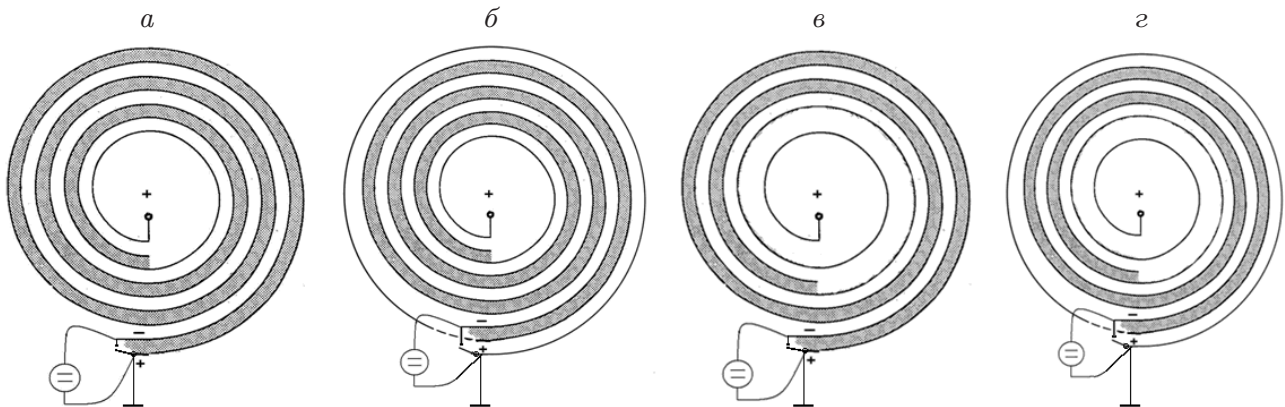


Рис. 1. Разновидности трансформаторов на основе спиральных волноводных структур:

темная полоса — активная линия, светлая — пассивная линия; *a* — спиральный генератор, *б* — генератор Белкина, *в*, *г* — комбинированные генераторы (*в* — с дополнительными внутренними витками, *г* — с дополнительными внутренними и внешними витками)

Генератор (трансформатор) Белкина [2] (рис. 1, *б*), названный в работе [3] модифицированным спиральным генератором, представляет собой спиральный генератор с дополнительными внешними витками [2]. Спиральный генератор является частным случаем трансформатора Белкина [3, 4].

Точные теоретические модели спирального генератора и трансформатора Белкина впервые предложены в работах [3, 4] и проверены экспериментально.

В комбинированном генераторе (рис. 1, *в*, *г*) добавлены внутренние витки одношинной линии, поэтому он представляет собой комбинацию спирального генератора либо трансформатора Белкина и рулонного трансформатора Тесла [5]. Витки добавлены для согласования времени прохождения волны по генератору с периодом колебаний в трансформаторе Тесла.

Конструкция генератора. В данной работе описывается общая конфигурация генератора (см. рис. 1, *г*) как с внешними, так и с внутренними дополнительными витками. Рассматриваемый генератор имеет параметры, определяемые целевыми размерами переносного импульсного рентгеновского аппарата. На разрезанный алюминиевый сердечник (рис. 2, *а*) диаметром 13 см намотано 16 витков одношинной обмотки, поверх них — 12 витков двухшинной линии и один дополнительный виток одношинной обмотки снаружи. Внешний диаметр конструкции со слоем изоляции, рассчитанным на 1000 кВ, составил 212 мм (рис. 2, *б*). Ширина медной шины всех обмоток равна 50 мм. Для исключения поверхностных пробоев ширина межвитковой изоляции из пленкосинтокартона составляла 300 мм. В генераторе использован феррит марки 200ВНП, общая площадь сечения сердечников, расположенных внутри генератора (см. рис. 2, *а*), составляет 20 см², снаружи (по периферии) (см. рис. 2, *б*) — 48 см². Собранный генератор с ферритами (рис. 2, *в*) имеет следующие электрические характеристики: входная емкость свернутой в рулон двухшинной линии — 25 нФ, индуктивность генератора — 407 мкГн, выходная емкость — 23 пФ. Длина одношинной линии составляет приблизительно 8 м, двухшинной — приблизительно 7 м. В предлагаемой высоковольтной модели комбинированного генератора коэффициент трансформации составляет $17 \div 20$, поэтому при зарядке линии до напряжения $40 \div 50$ кВ генератор дает выходное напряжение в диапазоне $850 \div 1000$ кВ с нарастанием $(5,0 \div 5,8) \cdot 10^{12}$ В/с. КПД системы равен 30–40 %, что сопоставимо с КПД аппаратов, построенных на основе трансформатора Тесла и работающих на первой полуволне.

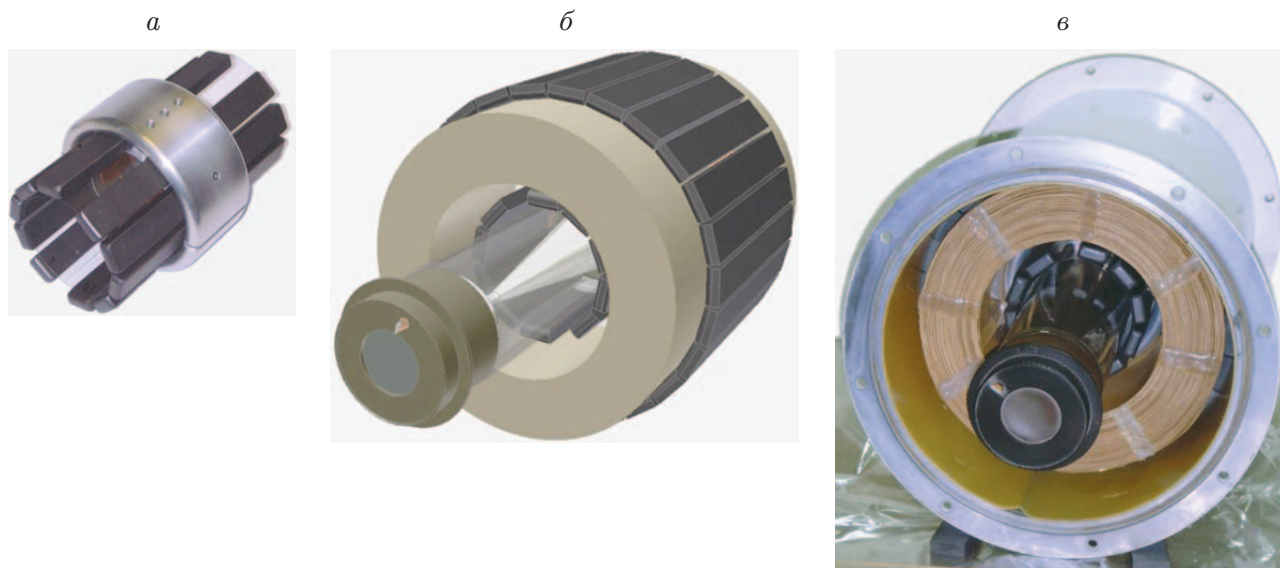


Рис. 2. Детали высоковольтной секции аппарата:

a — алюминиевый сердечник с ферритом внутри, *б* — генератор с рентгеновской трубкой и ферритом снаружи, *в* — генератор, помещенный в корпус аппарата

Осциллограмма выходного напряжения показана на рис. 3. Время выхода на максимум первой полуволны равно $t_1 = 170$ нс. В случае использования ферритовых сердечников увеличивается индуктивность системы, что приводит к замедлению процессов, происходящих в обмотках трансформатора типа модели трансформатора Тесла (но не влияет на распространение волны в зазорах между шинами витков). При этом время выхода первой полуволны на максимум за счет колебаний связанных индуктивностей в трансформаторе Тесла практически совпадает с временем нарастания напряжения, обусловленного наличием бегущей по генератору волны. Работа генератора на начальной стадии описана в работе [3]. Волны различной формы с различным временем задержки распространяются как по активной линии (темная полоса на рис. 1,2), так и по пассивной линии (светлая полоса на рис. 1,2). В точке перехода двухшинной линии в одношинную происходит расщепление волн: одна из них распространяется далее по одношинной линии, другая — в противоположном направлении (по активной и пассивной линиям). Время нарастания напряжения на выходе генератора (см. рис. 3) соответствует времени прохождения волны вперед и обратно по комбинированной спиральной намотке длиной 15 м. Таким образом удается получить высокий КПД предлагаемого трансформатора.

Предложенная схема с дополнительными внутренними витками и ферритовым сердечником обладает рядом преимуществ при создании импульсного рентгеновского аппарата с трехэлектродной трубкой ИА-8 [6]. Увеличение времени нарастания импульса в предлагаемом генераторе по сравнению с более простыми вариантами генератора (см. рис. 1, *a, б*) в данном случае оправданно, так как трехэлектродная трубка ИА-8 рассчитана на нарастание напряжения $2 \cdot 10^{12}$ В/с и в случае более быстрого нарастания будет пробиваться при напряжениях, значительно превышающих рабочее напряжение, равное 600 кВ. Запас по напряжению, составляющий $250 \div 400$ кВ, также увеличивает надежность срабатывания импульсной рентгеновской трубки.

Теоретическая модель процессов, происходящих в комбинированном генераторе. Для упрощения вида уравнений введем специальную систему единиц, в которой скорость распространения волны в активной и пассивной линиях, длина линий и началь-

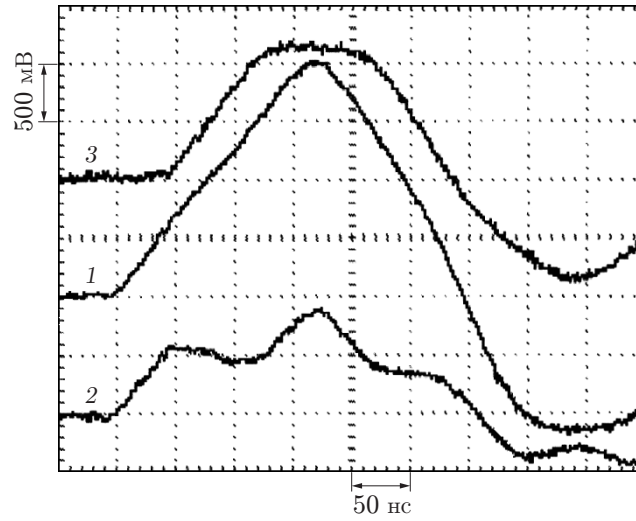


Рис. 3. Оциллограммы напряжения для комбинированного генератора с одним дополнительным витком и с сердечниками с ферритом:

1 — напряжение на выходе генератора, 2 — напряжение между внешним витком и концом двухшинной линии, 3 — напряжение на участке между началом одношинной линии и выходом генератора

ные напряжения в них равны единице. Для того чтобы перейти из безразмерной системы x, t, u, i в общепринятую систему единиц X, T, U, I (X — пространственная координата, T — время, U — напряжение, I — сила тока), положим

$$X = xl, \quad T = lt/c, \quad U = u_0u, \quad I = cC'u_0i,$$

где l — длина спиральной двухшинной линии генератора в развернутом виде; c — скорость электромагнитной волны в диэлектрике линии; u_0 — начальное напряжение между обкладками; C' — удельная (на единицу длины) емкость линии генератора в развернутом виде. Тогда уравнения, описывающие распространение электромагнитной волны в активной и пассивной линиях спирального генератора, записываются в следующем виде:

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

Начальные условия имеют вид

$$u_a(x, 0) = -1, \quad u_p(x, 0) = 1, \quad i_a(x, 0) = i_p(x, 0) = I_s = 0.$$

Здесь u_a, i_a, u_p, i_p — нормированные напряжение и сила тока в активной и пассивной линиях соответственно; N — число витков двухшинной линии; I_s — сила тока вследствие утечки зарядов вдоль витков; $i_a + i_b$ — сила тока, текущего через коммутатор; U_s — выходное напряжение генератора; U_{out} — суммарное напряжение на дополнительных витках.

Рассмотрим граничные условия для спирального генератора. Поскольку концы генератора не замкнуты, $i_a(1, t) = i_p(1, t) = 0$ (согласно введенной выше системе единиц единица в аргументе означает, что $x = l$). Силу тока на входе генератора обозначим $I_a = i_a(0, t)$, $I_p = i_p(0, t)$. Далее, задавая различные граничные условия, можно получить решения, соответствующие как всем имеющимся моделям, так и предлагаемой модели.

Решение указанной выше задачи для спирального генератора с дополнительными внешними витками приведено в работе [3].

При численном решении задачи для системы с внутренними дополнительными витками нужно учитывать как взаимодействие токов (I_s, I_p, I_a), так и наличие дополнительных внешних и внутренних витков. Для этого требуется задать граничные условия

$$\begin{aligned} N \frac{dI_s}{dt} - \frac{k_{sp}(n+1)N}{N+n+n_2} \frac{dI_p}{dt} + \frac{k_{sa}nN}{N+n+n_2} \frac{dI_a}{dt} &= \frac{\omega_0^2}{2N+n+n_2} U_s, \\ -k_{sa}n(N+n+n_2) \frac{dI_s}{dt} + \left(L_z \frac{\omega_0^2(N+n+n_2)^2}{N(2N+n+n_2)} + k_{ap}n(n+1) \right) \frac{dI_p}{dt} - \\ &- \left(L_z \frac{\omega_0^2(N+n+n_2)^2}{N(2N+n+n_2)} + n^2 \right) \frac{dI_a}{dt} = \frac{\omega_0^2(N+n+n_2)^2}{N(2N+n+n_2)} u_a(0), \quad (1) \\ k_{sp}(n+1)(N+n+n_2) \frac{dI_s}{dt} - \left(L_z \frac{\omega_0^2(N+n+n_2)^2}{N(2N+n+n_2)} + (n+1)^2 \right) \frac{dI_p}{dt} + \\ &+ \left(L_z \frac{\omega_0^2(N+n+n_2)^2}{N(2N+n+n_2)} + k_{ap}n(n+1) \right) \frac{dI_a}{dt} = \frac{\omega_0^2(N+n+n_2)^2}{N(2N+n+n_2)} u_p(0), \end{aligned}$$

где k_{ap}, k_{sp}, k_{sa} — коэффициенты связи между контурами, замыкающими активную и пассивную линии, пассивную линию и спираль генератора, активную линию и спираль генератора соответственно; n — количество дополнительных витков внешней шины вокруг генератора (согласно схеме, приведенной на рис. 1, з); n_2 — количество внутренних дополнительных витков. Обычно значение k_{ap} близко к единице, а $k_{sp} \ll k_{ap}, k_{sa} \ll k_{ap}$. Данная система уравнений позволяет моделировать реальную работу прибора в приближении без учета расщепления волн на границе двухшинной и одношинной линий.

Численные решения распространения волн вдоль активной и пассивной линий находились методом Годунова [7]. Для вычисления граничных условий (1) использовались явные разностные формулы первого порядка. Задача решалась численно в системах MATLAB и SciLab. На основе теоретических оценок разработаны рекомендации по размерам, количеству витков и составу изоляции для изготовления прототипа спирального генератора, рассчитанного на напряжение $600 \div 800$ кВ с ударной емкостью на выходе $25 \div 30$ пФ: внутренний диаметр — 130 мм, внешний диаметр — 200 мм, число витков — $16 \div 20$, площадь сечения внутреннего сердечника с магнитной проницаемостью $\mu = 200$ — 20 см².

На рис. 4 приведены расчетные зависимости напряжений на выходе генератора, на внешней и внутренней его частях от времени. Видно, что результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными осциллограммами.

Параметры прототипа аппарата. Схема высоковольтного генератора с цепью нагрузки была помещена в металлический контейнер с жидкой изоляцией, в качестве которой использовалось трансформаторное масло с измеренной электрической прочностью 61 кВ на стандартном промежутке 2,5 мм. Полученный прототип рентгеновского аппарата показан на рис. 5. Аппарат имеет следующие характеристики: рабочее напряжение — $600 \div 700$ кВ, доза излучения, измеренная дозиметром ДК-02 на расстоянии 21 см от фокуса, — 15 мР за одну вспышку, т. е. 0,66 мР/м, длительность вспышки — 30 нс, частота — до 10 Гц, масса — 43 кг, габариты — $695 \times 361 \times 361$ мм.

Заключение. Таким образом, создан действующий прототип импульсного рентгеновского аппарата на основе комбинированного спирального генератора с дополнительным внешним витком.

Разработана математическая модель, описывающая работу генераторов на основе спиральных волноводных структур (спирального генератора, трансформатора Белкина, комбинированного генератора).

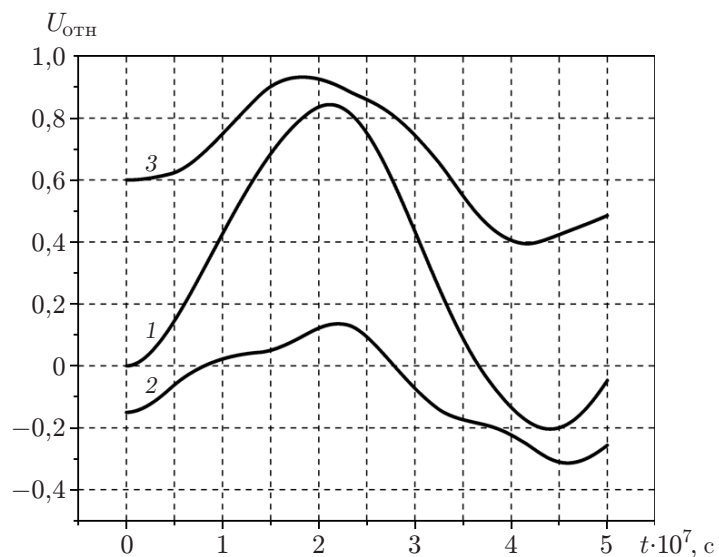


Рис. 4. Результаты численного моделирования напряжения на комбинированном генераторе с одним дополнительным витком и сердечниками с ферритом (обозначения те же, что на рис. 3)



Рис. 5. Общий вид прототипа импульсного рентгеновского аппарата

Проведено теоретическое моделирование процессов, происходящих в изготовленном комбинированном спиральном генераторе. На основе теоретических оценок разработаны рекомендации по размерам, количеству витков и составу изоляции генератора. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показывает, что они качественно согласуются.

Электрофизические параметры изготовленного прототипа аппарата, такие как напряжение на рентгеновской трубке до 600 кВ и КПД $30 \div 40$ %, сопоставимы с параметрами аппаратов на основе трансформатора Тесла, работающих на первой полувогне колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pat. GB975911A.** Pulse generators / R. A. Fitch, V. T. S. Howell. N 18136/61. Publ. 25.11.1964.
2. **А. с. 149494 СССР, МПК Н 01 F 27/28.** Импульсный трансформатор / Н. В. Белкин, А. Я. Жаркова. № 744249/26-9; Заявл. 06.09.1961; Оpubл. 01.01.1962, Бюл. № 16.
3. **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.
4. **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.
5. **Пальчиков Е. И., Долгих А. В., Красников И. Ю., Рябчун А. М.** Рулонный импульсный резонансный автотрансформатор // Сб. докл. Междунар. конф. “XIV Харитоновские тематические научные чтения: Мощная импульсная электрофизика”, Саров, 12–16 марта 2012 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2012. С. 148–153.
6. **А. с. 273345 СССР, МПК Н 01j 35/04, Н 01j 35/08.** Импульсная рентгеновская трубка / Е. И. Биченков, В. В. Полюдов, Р. Л. Рабинович, В. М. Титов, Н. А. Дронь, Н. И. Комяк, Е. А. Пеликс, В. М. Курбатов. Заявл. 23.09.1968; Оpubл. 15.06.1970, Бюл. № 20.
7. **Годунов С. К.** Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов, А. Н. Крайко, Г. П. Прокопов. М.: Наука, 1976.

*Поступила в редакцию 11/X 2018 г.,
после доработки — 11/X 2018 г.
Принята к публикации 29/X 2018 г.*
