

Модифицированный спиральный генератор высоких напряжений для питания импульсного рентгеновского аппарата

© Е.И. Пальчиков, А.М. Рябчун, И.Ю. Красников

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: palchikov@hydro.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 1 декабря 2010 г. В окончательной редакции 4 июня 2011 г.)

Экспериментально исследованы новые типы высоковольтных генераторов импульсных напряжений, разработанных на основе спиральных полосковых линий. Предложена новая теоретическая модель, описывающая работу этих устройств. Некоторые типы полученных генераторов показали высокий (до 25–50%) КПД. На основе модифицированного спирального генератора изготовлен действующий макет импульсного рентгеновского аппарата с выходными параметрами, достаточными для регистрации быстротекущих процессов.

Введение

Среди источников импульсов высокого напряжения наименее исследованными являются спиральный генератор и трансформатор (генератор) Белкина–Жарковой. Спиральный генератор, впервые предложенный Фитчем и Хауэллом [1], на самом деле является частным случаем импульсного трансформатора, который независимо и почти одновременно с ними предложили Н.В. Белкин и А.Я. Жаркова (ВНИИЭФ, г. Саров) [2]. Одним из основных преимуществ устройств такого типа является то, что в них не требуются первичные низковольтные и вторичные высоковольтные емкостные накопители энергии, т.е. первичный, вторичный накопители и трансформатор составляют единое целое. Таким образом, весь генератор состоит из 2–3 деталей.

Как было показано нами ранее [3], для описания различных конфигураций генераторов такого типа подходят как модели для трансформатора Тесла, так и модели, учитывающие распространение волн по длинной спиральной линии с инверсией. В отличие от спирального генератора Фитча–Хауэлла параметры трансформатора Белкина–Жарковой можно варьировать за счет незначительного изменения его конструкции — добавления внешних и внутренних витков.

Применение спиральных генераторов ограничивается их низким КПД. Проблемы возникают и при попытке „подогнать“ габаритные и энергетические характеристики трансформатора к характеристикам конкретных устройств, пригодных для практического использования.

Цель настоящей работы: 1) создание более точной, удобной в применении теоретической модели генератора, 2) создание конструкций генераторов, обладающих максимальным КПД при фиксированных внешних размерах, толщине пакета изоляции, входной и выходной емкостях, 3) применение модифицированного спирального генератора с повышенным КПД для создания импульсного рентгеновского аппарата (ИРА).

1. Принципиальные схемы генераторов

Спиральный генератор представляет собой свернутую в рулон двухшинную полосковую линию. Первоначально декларированный в [1] принцип его работы заключался в следующем: при замыкании заряженной двухшинной линии, свернутой в рулон, по активной линии (на рис. 1, *a* обозначена серым цветом) бежит волна, которая, дойдя до разомкнутого конца, отражается от него и возвращается, меняя свою полярность. При этом напряжения в активной и пассивной линиях всех слоев рулона суммируются с одним знаком и создают между внутренним и внешним витками напряжение, равное исходному, умноженному на удвоенное число витков в рулоне [1,4,5]. Из схем, приведенных на рис. 1, видно, что если к схеме спирального генератора Фитча–Хауэлла (рис. 1, *a*) добавить к внутренней шине снаружи один виток, то в результате получается тот же спиральный генератор (рис. 1, *b*), только меняется знак напряжения на выходе генератора, а активная и пассивная линии меняются местами. Аналогичный результат получается в результате убавления одного витка от внешней шины. То есть любая схема спирального генератора может быть представлена в виде двухшинной спиральной линии, которая разряжается на одиночный виток. Таким образом, генератор Фитча–Хауэлла является разновидностью трансформатора Тесла, предложенного Н.В. Белкиным и А.Я. Жарковой [2] (рис. 1, *c*) с частным случаем, когда количество витков в первичной обмотке равняется единице. Как видно из рис. 1, *d*, в результате добавления витка к внешней шине спирального генератора получается новое устройство, которое не является спиральным генератором, а является новым вариантом трансформатора Белкина–Жарковой.

Тот факт, что в результате простой геометрической перерисовки схемы и смены обозначений можно получить как спиральный генератор, так и трансформатор Тесла с рулонной емкостью, разряжаемой на один виток, ставит под сомнение корректность про-

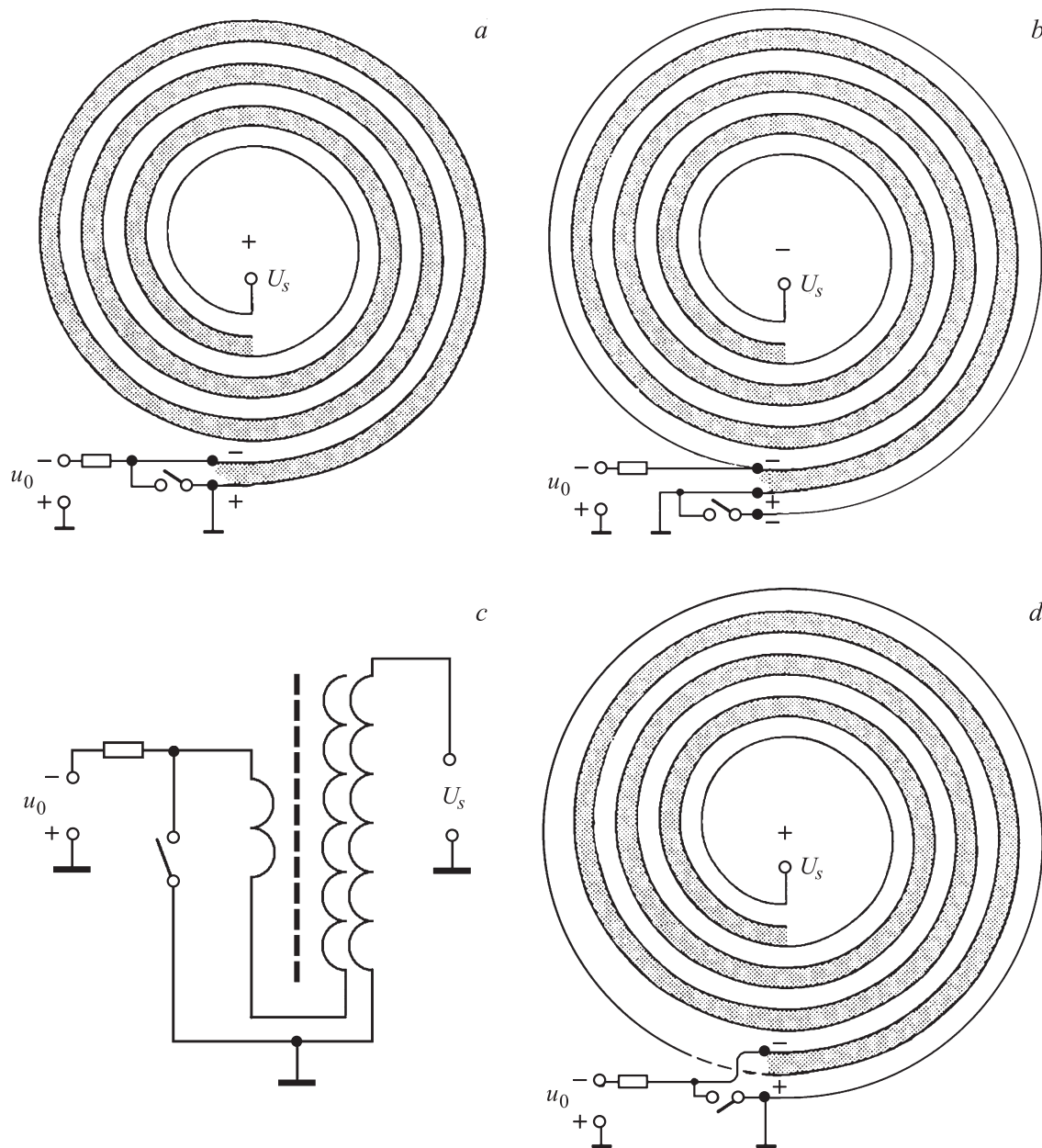


Рис. 1. Схемы генераторов: *a* — классический генератор Фитча–Хауэлла, *b* — спиральный генератор Фитча–Хауэлла с дополнительным витком к внутренней шине, *c* — трансформатор Белкина–Жарковой, *d* — вариант трансформатора Белкина–Жарковой с дополнительным витком к внешней шине.

стных моделей с инверсией напряжений, предложенных в работах Фитча–Хауэлла [1,5] и Рюля–Герцигера [4]. По крайней мере это справедливо для неидеальных спиральных трансформаторов, у которых толщина намотки сравнима с диаметром или индуктивность ключа не равна нулю. Как было показано нами ранее в [3], для описания такого генератора при малом числе витков и высокой индуктивности ключа лучше подходит модель трансформатора Тесла, а при большом числе витков и малой индуктивности ключа — модели Фитча–Хауэлла и Рюля–Герцигера. В модели Рюля–Герцигера нами было предложено [3] увеличить

точность расчетов за счет учета волны, бегущей по пассивной линии.

В модели Фитча–Хауэлла процесс стекания заряда с выходной емкости и индуктивная связь витков являются побочными паразитными эффектами на фоне процесса инверсии напряжения в длинной линии. В модели трансформатора Тесла, наоборот, волны, бегущие вдоль вторичной обмотки, являются побочным паразитным эффектом, а индуктивная связь и токи через обмотки — основными рассматриваемыми эффектами.

Волны во вторичной обмотке — рядовое явление в трансформаторе Тесла. Это явление может быть убрано

частично [6] либо полностью [7,8] за счет специального размещения витков вторичной обмотки в пространстве между высоковольтным и низковольтным электродами. Но данное решение известно только для двух видов трансформатора — с вторичной обмоткой в виде провода с дополнительными скин-экранами [7,8] и с вторичной обмоткой в виде тонкого рулона из проводящей фольги, гальванически несвязанной с первичной обмоткой. Решение для двухшинной намотки нам не известно. Очевидно, что для повышения КПД желателен согласовать процессы колебаний в первичном и вторичном контурах трансформатора с временами прохода волн в полосковых линиях трансформатора. Чтобы этого не делать методом подбора, желателен иметь теоретические модели работы спирального генератора и трансформатора Белкина–Жарковой, которые пригодны для инженерных расчетов и описывают работу данных устройств в деталях.

2. Новая теоретическая (расчетная) модель генератора на полосковых линиях

В ранних публикациях [1,5] работа спирального генератора описывалась только качественно. Феноменологически объяснялось, как по активной линии бегут волны и как складываются напряжения. Из этих пояснений можно оценить: 1) максимальное напряжение, которое можно получить на выходе такого генератора, 2) приблизительное время достижения этого максимума.

В работах [3,4] система дифференциальных уравнений, описывающих работу спирального генератора, решалась численно. Но сами эти уравнения были получены с помощью сложных аналитических преобразований для идеальных условий. Кроме того, в уточненной модифицированной модели, предложенной нами ранее в [3], поведение спирального генератора описывалось в виде системы дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом, и с каждым проходом бегущей волны по генератору эта система уравнений все более усложнялась. Никаких поправок и уточнений такой метод не позволяет использовать в принципе. В процессе решения получаются только выходные интегральные характеристики системы (напряжение и ток), проанализировать, что происходит внутри генератора на разных участках свернутой в рулон линии, нет возможности.

Поэтому для описания работы генератора было принято решение использовать численные методы математического моделирования. В этом случае бегущая волна в активных и пассивных линиях описывается телеграфным уравнением, а процессы стекания заряда с внутреннего витка по спиральной линии описываются в рамках простой модели колебательного контура. Такая система уравнений позволяет вводить поправки и выводить различные вспомогательные физические значения.

При выводе разностной модели спирального генератора использовались те же рассуждения, что и при выводе дифференциальных уравнений в [3], но с тем отличием, что физические процессы сразу же отображались в виде разностных уравнений. Для решения телеграфных уравнений использовалась схема Годунова, уже зарекомендовавшая себя для описания процессов в длинных линиях [9]. Полученная таким образом схема вычислений, оказалась очень простой для изменений и поправок. В отличие от предыдущих моделей [3,4,5] в предлагаемой модели учитывается взаимодействие между активной и пассивной линиями.

Для упрощения вида уравнений введем специальную систему единиц, в которой скорость распространения волны в активной и пассивной линиях, длина линий и начальные напряжения в линиях равны единице. Для перехода из безразмерной системы x, t, u, i в общепринятую систему единиц „координата X , время T , напряжение U , ток I “ положим, что

$$X = lx, \quad T = \frac{l}{c}t, \quad U = u_0u, \quad I = (cC'u_0)i, \quad (1)$$

где l — длина спиральной 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 развернутого генератора.

Тогда уравнения, описывающие распространение электромагнитной волны в активной и пассивной линиях спирального генератора, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_a}{\partial t} &= -\frac{\partial i_a}{\partial x} - Ni_s, & \frac{\partial u_p}{\partial t} &= -\frac{\partial i_p}{\partial x} - Ni_s, \\ \frac{\partial i_a}{\partial t} &= -\frac{\partial u_a}{\partial x}, & \frac{\partial i_p}{\partial t} &= -\frac{\partial u_p}{\partial x}, \\ u_s &= N \int_0^1 (u_a + u_p) dx. \end{aligned} \quad (2)$$

Начальные условия

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

Здесь u_a, i_a, u_p, i_p — нормированные напряжения и токи в активной и пассивной линиях соответственно, N — число витков, i_s — ток утечки зарядов вдоль витков, $(i_a + i_p)$ — ток через коммутатор и u_s — выходное напряжение генератора.

Рассмотрим граничные условия для спирального генератора. Поскольку концы генератора не замкнуты, получаем $i_a(1, t) = i_p(1, t) = 0$ (согласно введенной нами системе единиц, единица в аргументе означает, что $x = l$). Токи на входе генератора обозначим как $i_{0a} = i_a(0, t)$, $i_{0p} = i_p(0, t)$. Далее, задавая различные граничные условия, можно получить решения, соответствующие как всем предыдущим моделям, так и предложенной нами новой модели.

1. Модель, применявшаяся в работе Рюля и Герцигера [4], описывается следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} N^2 \frac{di_s}{dt} &= \frac{\omega_0^2}{2} u_s, \\ L_z \frac{di_{0a}}{dt} &= -\frac{\omega_0^2}{2} u_a(0), \\ \frac{di_{0p}}{dt} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь L_z — индуктивность ключа, поделенная на индуктивность одного витка генератора, ω_0 — безразмерная собственная частота спирального генератора в выбранной нами системе единиц (1), которая определяется по формуле $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \frac{l}{c}$, где L_0 — индуктивность спирали, C_0 — емкость между центральным и внешним витками (выходная емкость генератора). В случае тонкой намотки ($Nd \ll D$) получаем приближенное значение $\omega_0 \approx \sqrt{\frac{8Nd}{\mu D}}$ в системе единиц (1). Здесь d — толщина изоляции, D — диаметр генератора, μ — магнитная проницаемость магнитопровода (сердечника).

Основным недостатком данной модели является то, что при замыкании активной линии напряжения и токи в пассивной линии остаются неизменными, что не соответствует реальным устройствам.

2. В модели, рассмотренной нами ранее в работе [3], учтены волны, бегущие не только по активной, но и по пассивной линиям. Эта модель описывается следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} N^2 \frac{di_s}{dt} &= \frac{\omega_0^2}{2} u_s, \\ L_z \frac{di_{0a}}{dt} &= -\frac{\omega_0^2}{2} u_a(0), \\ (L_z + 1) \frac{di_{0p}}{dt} &= -\frac{\omega_0^2}{2} u_p(0). \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку ток, замыкающий пассивную линию, проходит через один виток (внешнюю шину) от ключа, к значению L_z добавляется единица. Основным недостатком модели [3] является отсутствие индуктивного взаимодействия между токами в активной (i_{0a}), пассивной i_{0p} линиях и током утечки i_s . Причиной упрощения модели было желание получить решение в аналитическом виде.

3. В случае предлагаемого в настоящей работе численного решения можно учитывать как взаимодействие между токами i_s , i_{0p} , i_{0a} , так и введение дополнительных внешних витков, что позволяет исследовать более реалистичную модель, задаваемую следующими граничными условиями:

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

$$\begin{aligned} k_{sp}N(n + 1) \frac{di_s}{dt} - (L_z + (n + 1)^2) \frac{di_{0p}}{dt} & \\ + (L_z + k_{ap}n(n + 1)) \frac{di_{0a}}{dt} &= \frac{\omega_0^2}{2} u_p(0), \end{aligned} \quad (5)$$

где k_{ap} , k_{sp} , k_{sa} — коэффициенты связи между контурами, замыкающими активную и пассивную линии, пассивную линию и спираль генератора и активную линию и спираль генератора соответственно; n — количество дополнительных витков внешней шины вокруг генератора (согласно схеме, приведенной на рис. 1, *d*). Обычно значение k_{ap} близко к единице, а k_{sp} , $k_{sa} \ll k_{ap}$.

Численные решения распространения волн вдоль активной и пассивной линий находились с помощью метода Годунова [9]. Для вычисления граничных условий (5) использовались явные разностные формулы первого порядка. Использование численного метода дает гибкость в изменении модели и возможности для проверки расчетов. Например, результаты расчетов, проведенных по предложенной нами ранее в [3] модифицированной модели с граничными условиями (4), совпали для обоих случаев: и для численного, и для аналитического методов расчета. Различие состоит в том, что расчет по новой модели может быть с легкостью продолжен для большего количества периодов колебаний, что невозможно в моделях [3,4]. Кроме того, численный метод счета позволяет легко учитывать любые поправки — изменения в конструкции, изменения граничных условий, физические эффекты (затухание, скин-эффект, введение дополнительных витков и т.д.).

3. Экспериментальное исследование различных модификаций генераторов

3.1. Описание макетов генераторов

Для исследования работы генераторов были изготовлены макеты фиксированных габаритов по схемам рис. 1, *a, d*. Внешний диаметр пакета обмоток макетов составлял 210 мм. Такое значение внешнего диаметра выбиралось с учетом того, что массогабаритные характеристики генератора (трансформатора) должны быть пригодны для создания портативного ИРА: толщина изоляции в линии должна быть достаточной для надежной работы, количество витков спирали — минимальным, а КПД при этом должен быть достаточно высоким. Толщина пакета изоляции рассчитывалась с учетом, что рабочее выходное напряжение генератора будет составлять 600–100 кВ. Пакет с многослойной изоляцией (общая толщина 40 мм) состоял из ламинированного лавсановой пленкой электрокартона. В макете базовой версии 16 витков двухшинной медной линии шириной 50 мм, разделенных четырехслойным композитным изолятором толщиной 1 мм, были намотаны на пустотелый разомкнутый алюминиевый сердечник

диаметром 130 mm и высотой 65 mm с закругленными кромками. Генератор обладал следующими характеристиками: входная емкость свернутой в рулон двухшинной полосковой линии 22 pF, индуктивность спирального генератора $40.2 \mu\text{H}$, выходная емкость вторичной цепи (генератора) 24 pF, длина двухшинной линии $\approx 9 \text{ m}$.

С помощью макетов данного типа были проведены исследования спирального генератора (рис. 1, *a*) и генератора с одним дополнительным витком к внешней шине (рис. 1, *d*). Для исследования работы этих двух генераторов снимались осциллограммы как без использования магнитопроводов, так и с применением магнитопровода, помещенного внутрь разомкнутого ферритового рулона.

Помимо измерений выходных параметров схем с коммутацией на конце линии, производились измерения для тех же схем, но с коммутацией в середине спиральной линии.

В качестве коммутатора применялся ртутный геркон с временем замыкания менее 1 ns и индуктивностью 29 nH. Данное значение индуктивности близко к значениям, получаемым при подсоединении к двухшинной линии стандартных промышленных разрядников. В качестве материала магнитопроводов применялся никель-цинковый феррит марки 200ВНП общим сечением 16 cm^2 и длиной 190 mm, обладающий высоким ($> 10^7 \Omega\text{m}$) удельным сопротивлением и диэлектрической проницаемостью, близкой к проницаемости материала, применяемого для изоляции рулона. Благодаря этим свойствам ферритовые магнитопроводы почти не влияли на выходную емкость и электрическую прочность генератора. В случае, когда генератор помещался в замкнутую проводящую оболочку, по его периметру укладывался магнитопровод из пластин феррита сечением 45 cm^2 . При этом вид и амплитуда осциллограмм напряжений на генераторе оставались примерно такими же, как при отсутствии проводящей оболочки и магнитопровода по периметру.

Измерение выходного напряжения и определение формы сигналов в генераторе производились с помощью осциллографа Tektronix TDS-224 со специально изготовленными нами широкополосными емкостно-резистивными компенсированными делителями с коэффициентом деления 100 и входной емкостью 1.4 pF. Временное разрешение делителей лучше 5 ns, погрешность калибровки — не более 1%.

3.2. Выходные характеристики макетов обычного спирального генератора и генератора с одним дополнительным внешним витком без ферритового магнитопровода

Осциллограммы выходного напряжения U_s спиральных генераторов (см. схемы рис. 1, *a, b*) без ферритового магнитопровода приведены на рис. 2, *a*. Форма амплитуд первых шести полуволн U_s и количество полуволн

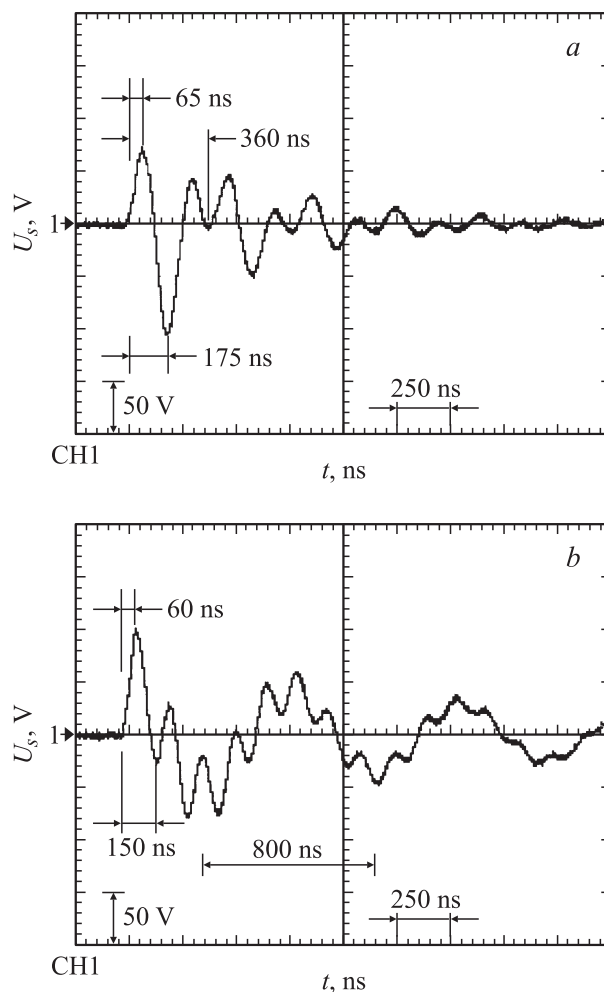


Рис. 2. Осциллограммы напряжений U_s на выходе генератора без ферритовых магнитопроводов: *a* — спиральный генератор (схема рис. 1, *a*); *b* — генератор с одним дополнительным витком (схема рис. 1, *d*).

внутри цикла биений (3 : 1), согласно модели трансформатора Тесла, соответствует коэффициенту связи обмоток трансформатора $k \approx 0.6$. При таком значении k почти вся энергия, накопленная в первичной емкости трансформатора, передается на второй полуволне во вторичную емкость трансформатора (при отсутствии волн во вторичной обмотке), что говорит о перспективности данного макета спирального генератора без применения ферритов для работы на второй полуволне U_s с разрядником-обострителем. Время выхода на максимум в первой полуволне составляет $t_1 = 65 \text{ ns}$, на второй — $t_2 = 175 \text{ ns}$. Расчетное время прохождения волны по 9 m спиральной линии составляет $lc = 50.04 \text{ ns}$. Измеренное время нарастания выходного сигнала (65 ns) меньше времени распространения волны по спиральной линии туда-обратно (100 ns) (по модели Фитча-Хауэлла это соответствует нарастанию напряжения на выходе генератора). Таким образом, модель трансформатора Тесла лучше подходит для описания данной сборки, хотя в

данном случае значительная часть энергии остается в противофазной волне, которая идет по двухшинной линии. Не стоит ожидать, что энергия полностью перейдет из первичного накопителя во вторичный на второй полуволне. Измеренный полупериод низкочастотных колебаний (цикл биений) составляет 360 ns, а полупериод высокочастотных колебаний в связанных контурах 120 ns. КПД на первой полуволне составляет 5.3, а на второй — 13%.

На рис. 2, *b* приведена осциллограмма выходного напряжения генератора с одним дополнительным внешним витком (см. схему рис. 1, *d*) без использования феррита. Добавление всего одного дополнительного внешнего витка приводит к кардинальному изменению формы выходного сигнала U_s . Амплитуда первой полуволны становится больше, чем второй, а форма сигнала U_s становится близкой к форме идеальной модели генератора, в которой утечка заряда считается нулевой [4,5]. Время выхода на максимальное значение U_s в первой полуволне составляет $t_1 = 60$, во второй — $t_2 = 150$ ns. Полупериод низкочастотных колебаний 400 ns, а полупериод высокочастотных колебаний 80 ns. Согласно данным работы [10], вид осциллограмм U_s , приведенных на рис. 2, *b*, соответствует коэффициенту связи $k \approx 0.9$. Амплитуда второй полуволны U_s составляет 1/4 от амплитуды первой полуволны, что соответствует 1/6 от энергии первой полуволны. В режиме работы генератора на первой полуволне данная форма импульса хорошо подходит как для случая непосредственного подключения рентгеновской трубки к выходу генератора, так и для случая, когда на выходе генератора используется разрядник-обостритель. При случайном пропуске первой полуволны исключается срабатывание трубки или разрядника на второй полуволне и протекание через нагрузку тока непредусмотренной полярности. Рентгеновские аппараты, работающие на первой полуволне, лучше подходят для исследования однократных быстротекущих процессов, поскольку у них время задержки от момента подачи сигнала запуска до вспышки меньше. Также повышается надежность срабатывания разрядника-обострителя. КПД данной сборки на первой полуволне составляет 10.9%.

3.3. Выходные характеристики макетов обычного спирального генератора и генератора с одним дополнительным внешним витком с ферритовым магнитопроводом

Осциллограммы выходного напряжения для случая, когда ферритовые сердечники сечением 16 см² помещены в центральную область генератора и сечением 45 см² расположены по периферии генератора, показаны на рис. 3. Нуль отсчета каждой осциллограммы находится напротив маркера канала. Напряжение на внутренней части обмотки (канал М, сигнал 3) — разница между выходным напряжением генератора (канал 1, сигнал 1)

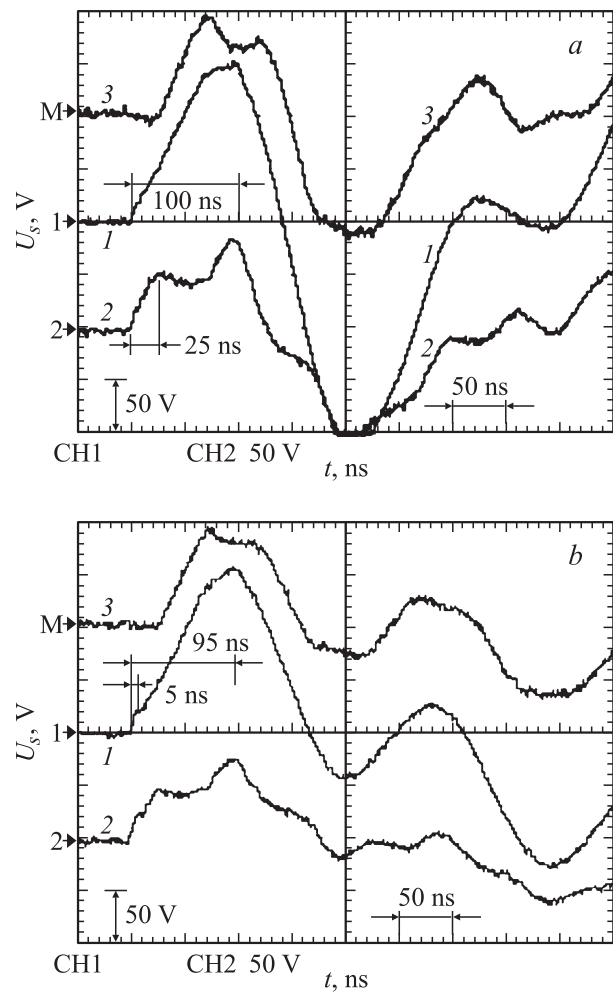


Рис. 3. Осциллограммы напряжений на генераторах с ферритовыми магнитопроводами: *a* — спиральный генератор (схема рис. 1, *a*), *b* — генератор с одним дополнительным витком (схема 1, *d*). 1 — напряжение на выходе генератора, 2 — напряжение между внешним витком и серединой обмотки, 3 — напряжение между серединой обмотки и выходом генератора.

и напряжением, измеренным на внешней части обмотки (канал 2, сигнал 2). Видно (рис. 3, *a*), что время выхода на максимальное значение U_s в первой полуволне составляет $t_1 = 100$ ns (что соответствует времени прохождения волны по линии длиной 9 м туда-обратно), во второй полуволне — $t_2 = 210$ ns; полупериод колебаний выходного напряжения генератора составляет 150 ns. Видно, что в результате использования ферритового сердечника процесс разрядки спирали замедляется, расчетный период колебаний в спирали, согласно модели в виде колебательного контура, увеличивается в 2.1 раза. При этом решающее влияние на скорость выхода первой полуволны на максимальное значение оказывает бегущая по генератору волна. Из приведенных на рис. 3, *a* осциллограмм видно, что на участке „внешний виток—середина обмотки“ (канал 2) идет нарастание сигнала (кривая 2) в течение первых 25 ns работы

генератора, что соответствует времени прохода волной внешней половины обмотки спирали длиной 4.5 м. На внутренней половине обмотки (канал М, сигнал 3) сначала в течение 25 ns напряжение не меняется и равно нулю, затем оно начинает расти в течение 50 ns, что соответствует времени прохода волной расстояния 9 м. Получается, что волна, пройдя по второй половине двухшинной линии, отражается от разомкнутого конца и идет обратно. В течение всего этого времени напряжение на канале 2 медленно убывает, что можно объяснить омическими потерями и стеканием заряда. Отразившаяся волна через 75 ns снова проходит по внешней половине спирали, и напряжение на канале 2 снова возрастает. Все это время на выходе генератора наблюдается почти прямолинейный рост напряжения, что несомненно свидетельствует о волновой природе происходящих в генераторе процессов.

Использование ферритовых сердечников приводит к увеличению индуктивности спиральной катушки, уменьшению стекания заряда через паразитную индуктивность спирали, что повышает КПД данной сборки до 24.5% на первой полуволне и до 52.7% на второй полуволне.

Аналогично в случае генератора Белкина–Жарковой с одним дополнительным внешним витком (рис. 1, *d*), применение ферритового сердечника приводит к увеличению КПД до 24.5%, при этом основное влияние на время выхода первой полуволны на максимальное значение начинает оказывать бегущая по генератору волна. Появление ступеньки на осциллограммах рис. 3, *b* через 3–5 ns после начала роста напряжения связано с отражением и разветвлением волны после прохождения ею первого (дополнительного внешнего) витка. В случае катушки двух дополнительных витков время появления ступеньки сдвигается на 6–10 ns. Как и в случае без ферритового магнитопровода (рис. 2, *b*), амплитуда первой полуволны примерно в 4 раза больше, чем второй.

Преимуществом схемы с дополнительным внешним витком (рис. 1, *d*) является слабая зависимость амплитуды выходного сигнала от индуктивности коммутатора, чего нельзя сказать про схему обычного спирального генератора (рис. 1, *a*). В генераторе высоковольтных импульсов, используемом в рентгеновском аппарате, очень удобно иметь конструктивную возможность выносить коммутатор на некоторое расстояние от высоковольтной сборки, особенно в случае, когда коммутатор управляемый.

3.4. Выходные характеристики макетов спиральных генераторов с ферритовым магнитопроводом при замыкании двухшинной линии посередине

В спиральных генераторах с ферритовым магнитопроводом в случае, когда двухшинная линия замыкается не на входе, а в середине, время выхода первой полуволны на максимальное значение составляет $t_1 = 50$ ns, на минимальное во второе полуволне — $t_2 = 100–120$ ns.

Поскольку в данном генераторе двухшинная линия замыкается в середине, по нему бегут в разные стороны две волны и, следовательно, время прохода по линии уменьшается вдвое. Система внешних магнитных полей генератора представляет собой один квадруполь, коаксиально вложенный в другой квадруполь таким образом, что их внешние поля вычитаются. Время прохода волны по спирали туда-обратно существенно меньше времени выхода на первую полуволну колебаний согласно модели трансформатора Тесла. Индуктивность ключа, емкости первичной и вторичной цепей всей сборки не менялись. Индуктивность спирали (вторичного контура) для колебаний по модели трансформатора Тесла (она же индуктивность для токов, стекающих по спирали) увеличилась в 4.5 раза за счет применения ферромагнитных сердечников. Данная конфигурация обладает высоким (35.3%) КПД, так как за это время стекание заряда оказывается незначительным.

Конструкция на базе стандартного спирального генератора (рис. 1, *a*), в котором спиральная линия замыкается посередине, а зарядник работает на самопробой, используется в дефектоскопических ИРА [11], однако ее использование осложнено необходимостью коммутации разрядника, находящегося под импульсным высоковольтным потенциалом. Это практически исключает внешний запуск ИРА и его использование для регистрации быстротекущих однократных процессов. Также сложно выполнить оптимальную изоляцию всей сборки (рулон с коммутатором посередине) при высоких (более 300 kV) выходных напряжениях.

На генераторе Белкина–Жарковой с одним дополнительным витком (рис. 1, *d*) и коммутацией посередине линии было получено увеличение КПД до 39.3% при близком к нулю значении амплитуды второй полуволны.

4. Сравнение экспериментальных измерений с расчетами по новой теоретической модели

Габаритные и электрические параметры экспериментально исследованных нами макетов спирального генератора были приняты в качестве начальных параметров для расчета по новой теоретической модели. На рис. 4, *a, b* приведены результаты вычислений нормированных напряжений ($u_s/2N$) между началом и концом всей обмотки (кривая 1), а также на внешней (кривая 2) и внутренней (кривая 3) частях обмотки спирального генератора. Чтобы графики не перекрывались, нуль отсчета для кривой 2 сдвинут на 0.5 вниз, кривой 3 на 0.5 вверх. Также на рис. 4, *c, d* приводятся распределения потенциалов вдоль пассивной (u_p) и активной (u_a) линий в момент, когда волна прошла 3/4 их длины. Дополнительные данные по напряжениям „внешний виток–середина обмотки“, „середина обмотки–выход генератора“ и по распределению потенциалов вдоль линии были получены незначительными изменениями

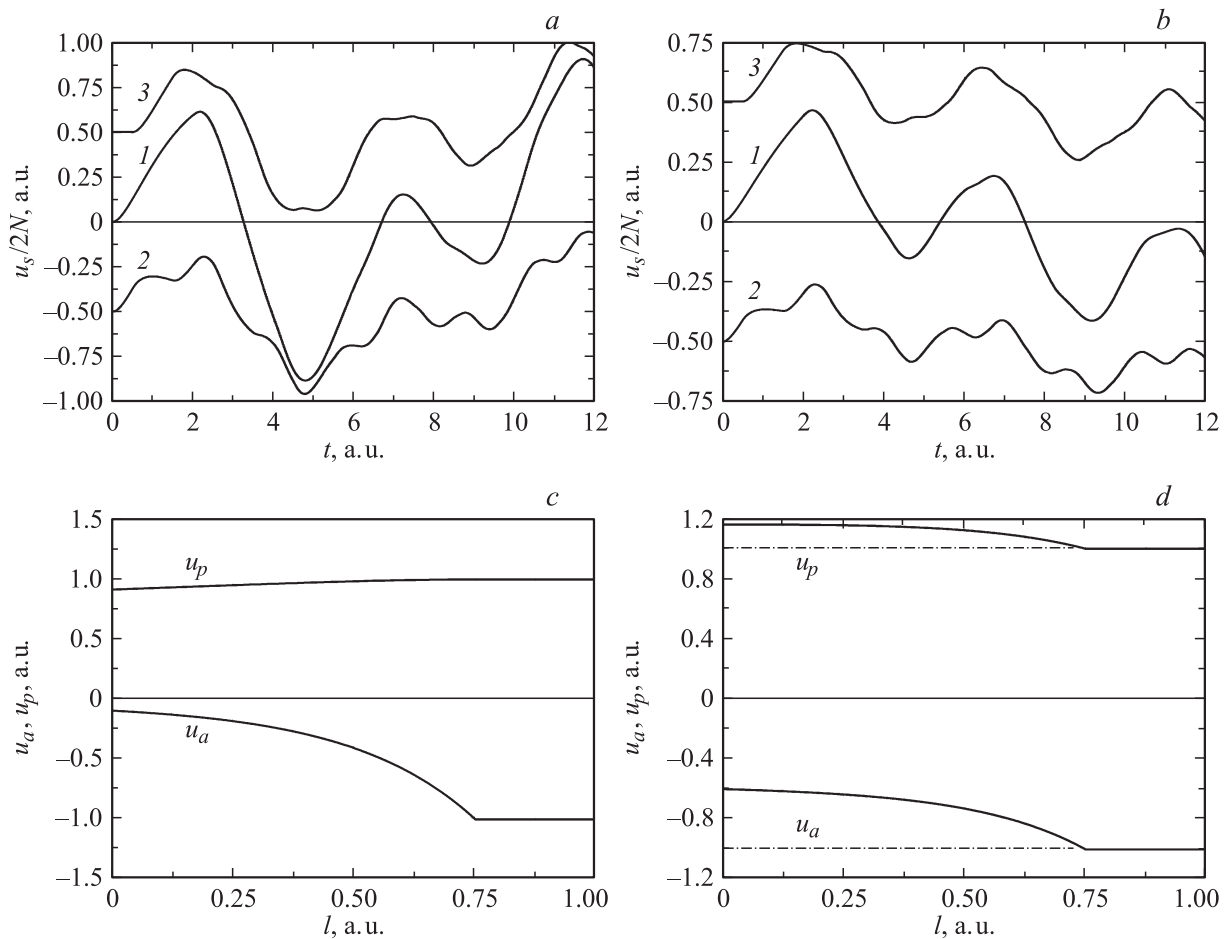


Рис. 4. Расчетные графики напряжений на генераторах с ферритовыми магнитопроводами: *a* — спиральный генератор (схема рис. 1, *a*), *b* — генератор с одним дополнительным витком (схема рис. 1, *d*), *c, d* — распределение напряжений вдоль активной (u_a) и пассивной (u_p) линий для спирального генератора и для генератора с дополнительным витком. 1 — напряжение ($u_s/2N$) на выходе генератора, 2 — напряжение между внешним витком и серединой обмотки, 3 — напряжение между серединой обмотки и выходом генератора.

основной программы. Расчет графиков производился без учета омических потерь.

Видно, что результаты расчета, приведенные на рис. 4, *a, b*, достаточно хорошо согласуются с осциллограммами, приведенными на рис. 3. Коэффициент трансформации (амплитуда на выходе) реального спирального генератора значительно ниже приведенного расчетного (см. рис. 4, *a*), так как в классическом генераторе без дополнительного витка фронт волны в активной линии (u_a) резко падает (см. рис. 4, *c*), в результате чего из-за скин-эффекта возникают большие потери. В генераторе Белкина–Жарковой с одним дополнительным витком (рис. 1, *d*) все фронты более пологие и таких потерь нет (см. рис. 4, *d*). Это различие особенно велико для многovitковых генераторов. Дополнительный виток в схеме (рис. 1, *d*) образует автотрансформатор, через который происходит подзарядка пассивной линии за счет разрядки активной линии (рис. 4, *d*). Поэтому знаки волн в пассивной линии (u_p) на рис. 4, *c* и рис. 4, *d* отличаются. Следует отметить, что, несмотря на то что формы

волн (рис. 4, *c, d*) вдоль линий сильно различаются, интегральные картины для первой полуволны напряжений на витках различных генераторов (рис. 4, *a, b*) имеют большое сходство.

Что касается размерных факторов, то, как отмечалось ранее в работе [5], в случае, когда толщина катушки рулона мала по сравнению с диаметром рулона ($Nd \ll D$), КПД генератора увеличивается и выходной импульс имеет форму, близкую к треугольной. Однако при соблюдении соотношения $Nd \ll D$ генератор будет напоминать по своей форме велосипедное колесо или большой тонкостенный цилиндрический сосуд — значительная часть занимаемого им объема не будет использоваться. С другой стороны, как показывает наша модель, при сохранении значения параметра $\frac{Nd}{D}$ постоянной собственная частота $\omega_0 \approx \sqrt{\frac{8Nd}{\mu D}}$ в безразмерных единицах остается неизменной. Это означает, что при фиксированных значениях внутреннего и внешнего диаметров генератора вид осциллограмм на рис. 4, *a, b* не

зависит от количества витков. При переходе к физическим системам единиц изменятся только масштабы по напряжению и времени.

5. Сравнение КПД различных модификаций генераторов

Все рассматриваемые модификации генераторов имели одинаковые геометрические размеры, входную (22 нФ) и выходную (24 пФ) емкости и пакет изоляции, рассчитанный на напряжение 600–800 кВ. КПД системы вычислялся по формуле $\eta = \frac{C_2}{C_1} m^2$, где m — коэффициент трансформации, C_1 , C_2 — емкости первичного и вторичного накопителей энергии соответственно (выходная емкость генератора и емкость свернутой в спираль двухшинной линии).

В таблице приведены полученные результаты для двух типов генераторов: классического генератора Фитча–Хауэлла (тип 1) и генератора Белкина–Жарковой с одним дополнительным витком (тип 2) (КПД на второй полувольтне учитывался в таблице только в случаях, когда первая полувольтна меньше второй).

Классический спиральный генератор без модификаций является генератором с очень низким КПД. Коэффициент трансформации 16-виткового генератора составляет ≈ 7 на первой полувольтне, что соответствует КПД всего 5.3%, и на второй полувольтне коэффициент трансформации составляет ≈ 11 , что соответствует КПД 13.1% (таблица, № 1). Значительно меньший по сравнению с идеальной моделью КПД объясняется тремя причинами. Первая — стекание заряда вдоль витков спирали, которое настолько выражено, что процесс спада напряжения за счет стекания заряда опережает процесс перезарядки в линии. В результате этого напряжение на выходе генератора проходит через максимум гораздо раньше прихода отраженной волны (через 65 вместо 100 нс). Вторая причина — омические потери. Третья — остаточные колебания внутри двухшинной линии, составляющей спиральный генератор.

КПД различных модификаций спирального генератора

№ пп	Модификация генератора	Коэффициент трансформации первой/второй полувольтн	КПД первой/второй полувольтн, %
1	Тип 1, классическая схема	7/11	5.3/13.1
2	Тип 1 с ферритом	15/22	24.5/52.7
3	Тип 1 с ферритом; замыкание двухшинной линии посередине	18	35.3
4	Тип 2	10	10.9
5	Тип 2 с замыканием двхшинной линии посередине	12.5/20	17/43.6
6	Тип 2 с ферритом	15	24.5
7	Тип 2 с ферритом; замыкание двухшинной линии посередине	19	39.3

Видно, что использование ферритовых сердечников увеличивает выходное напряжение примерно в 2 раза, что соответствует увеличению КПД в 4 раза.

Таким образом, можно выделить ряд модификаций трансформатора, имеющих высокий КПД и пригодных для различных целей.

Для работы на второй полувольтне хорошо подходит классический спиральный генератор (тип 1) со вставленными в центральную часть и обложенными по периферии ферритовыми сердечниками. Эта модификация имеет на второй полувольтне КПД выше 50% (таблица, № 2).

Для работы на первой полувольтне по КПД и форме импульса подходит модификация спирального генератора с одним дополнительным витком (тип 2) и коммутированием двухшинной линии посередине. КПД такой модификации составляет примерно 39% (см. таблицу, № 7), что выше, чем у модификации, применяемой для ИРА в работе [11] (таблица, № 3).

Модификация генератора типа 2 лучше всего подходит для случая, когда необходимы коммутации на внешнем конце двухшинной линии и работа на первой полувольтне (24.5%; см. таблицу, № 6).

6. Применение модифицированного спирального генератора для создания ИРА

На основе полученных экспериментальных и теоретических данных была изготовлена высоковольтная версия трансформатора для создания макета импульсного рентгеновского аппарата, пригодного для регистрации быстротекущих процессов. Использовалась модификация спирального генератора (рис. 1, *d*) без ферритов с одним дополнительным внешним витком, с коммутацией на внешнем конце линии со следующими параметрами: внутренний диаметр 185 мм, внешний 217 мм, толщина медной фольги 30 мкм, ширина медной фольги 115 мм, количество витков спирали 40. В линиях применялась многослойная лавсановая изоляция толщиной 100 мкм и шириной 270 мм. Вся сборка погружалась в трансформаторное масло. Линия коммутировалась управляемым разрядником РУ-62 с интервалом рабочих напряжений 5–10 кВ.

Генератор обладал следующими характеристиками: входная емкость свернутой в рулон двухшинной полосковой линии 1.5 мФ, индуктивность генератора 217 мкН, выходная емкость 210 пФ. Применение дополнительного внешнего витка в этом многовитковом генераторе позволило увеличить коэффициент трансформации на 30%, что соответствует увеличению КПД на 70%. Кроме того, вторая полувольтна колебаний на выходе практически отсутствовала.

На рис. 5 приведены фотографии макета и осциллограмма импульса на выходе генератора. Коэффициент трансформации такого генератора составляет $m = 18$, а время выхода на максимум в первой полувольтне 490 нс.

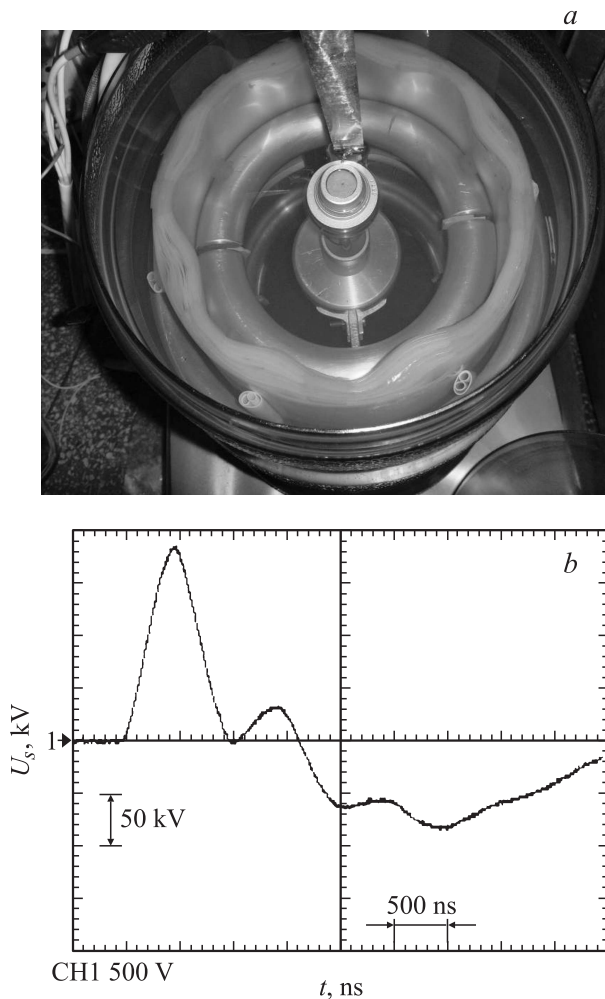


Рис. 5. Рентгеновский аппарат: *a* — фотография макета рентгеновского аппарата, помещенного в емкость с трансформаторным маслом; *b* — осциллограмма выходного напряжения U_s , полученная на многовитковом спиральном генераторе с дополнительным внешним витком (схема рис. 1, *d*).

Диапазон выходных напряжений 90–180 кВ. КПД данного трансформатора составляет 22%, что более чем в 2 раза превышает КПД, полученный на спиральных генераторах в работах [5,12], и сравним с КПД ИРА на трансформаторах Тесла, работающих на первой полуволе [3,10].

К выходу генератора была подключена цепь с разрядником-обострителем Р-48 и импульсной рентгеновской трубкой ИМА6-Д. Напряжение срабатывания разрядника — 100 кВ.

На данном аппарате на расстоянии 90 см была получена доза 1.7 мР за одну вспышку. Такой дозы достаточно для съемки рентгенограмм быстротекающих и однократных процессов. С помощью изготовленного макета рентгеновского аппарата на детекторе ВаFBr : Eu Image Plate были получены рентгеновские снимки тестовых объектов. Параметры генератора подробно описаны в

работе [13]. Тестовые рентгеновские снимки и спектр излучения аппарата приведены в работе [14].

Выводы

Изготовлены и испытаны 2 вида генераторов: классический спиральный генератор Фитча–Хауэлла и трансформатор Белкина–Жарковой, выполненные в различных модификациях: с одним дополнительным внешним витком; различными магнитопроводами; различными способами коммутации. Показано, что генератор Фитча–Хауэлла является частным случаем трансформатора Белкина–Жарковой; добавление всего лишь одного витка может радикально изменить коэффициент связи контуров трансформатора и форму колебаний на выходе, а также увеличить КПД устройства.

Разработана новая теоретическая модель, описывающая как трансформатор Белкина–Жарковой с различным количеством дополнительных внешних витков, так и его частный случай — спиральный генератор Фитча–Хауэлла.

Для различных сборок с фиксированным внешним диаметром намотки 21 см и толщиной изоляции, рассчитанной на выходное напряжение 600–1000 кВ, получены КПД: до 40% на первой полуволе и более 50% на второй полуволе. Наилучшим КПД на первой полуволе обладает трансформатор Белкина–Жарковой с одним дополнительным внешним витком, ферритовыми сердечниками, с замыканием двухшинной линии либо посередине (КПД 40%), либо снаружи (КПД 25%). На второй полуволе наилучшим КПД обладает классический спиральный генератор с использованием ферритовых сердечников, в котором двухшинная линия замыкается снаружи (КПД 50%). Полученные значения КПД в 4–5 раз превышают КПД других, известных нам по публикациям, спиральных генераторов.

Выработаны рекомендации по использованию различных видов спирального генератора с повышенным КПД для создания ИРА.

На основе модифицированного спирального генератора с одним дополнительным внешним витком изготовлен и испытан макет ИРА с выходными параметрами, достаточными для регистрации быстротекающих процессов.

Список литературы

- [1] Fitch R.A., Howell V.T.S. Patent Appl. 18 136, 1961.
- [2] Белкин Н.В., Жаркова А.Я. А.с. № 149 494 СССР, Класс 21d2, 49. Импульсный трансформатор. Заявлено 06.09.1961 г. за №744249/26-9. Бюлл. изобр. 1962. № 16.
- [3] Биченков Е.И., Башкатов Т.Ю., Пальчиков Е.И., Рябчин А.М. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 12. С. 66–72.
- [4] Рюль Ф., Герцигер Дж. // Приборы для научных исследований. 1980. № 11. С. 103–110.

- [5] *Fitch R.A., Howell V.T.S.* // Proc. IEEE. 1964. Vol. 111. P. 849–855.
- [6] *Абрамян Е.А., Вассерман С.Б., Долгушин В.М., Казарезов И.В., Куценко В.Ф., Радченко В.М.* Перенапряжения на высоковольтном импульсном ускорителе. Препринт № 48–71. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1971.
- [7] *Рабинович Р.Л.* Исследования по созданию мощного переносного аппарата для рентгенографии быстропротекающих процессов. Автореф. канд. дис. Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, М.: НИИ интроскопии Минприбор, 1984.
- [8] *Пальчиков Е.И., Биченков Е.И.* // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33. № 3. С. 159–167.
- [9] *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
- [10] *Пальчиков Е.И.* Исследование условий повышенного КПД импульсного рентгеновского аппарата и разработка уставки контроля веществ при динамическом нагружении. Автореф. канд. дис. Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, М.: НИИ интроскопии Минприбор, 1986.
- [11] *Golden J., Golden P.* U.S. Patent N 5, 442, 677. Date of patent Aug. 15, 1995.
- [12] *Brau C., Raybun J., Dodge J., Gilman F.* // Rev. Sci. Instrum. 1977. Vol. 48. N 9. P. 1154–1160.
- [13] *Пальчиков Е.И., Красников И.Ю.* // Тез. докл. XII Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам. Новосибирск, 2008. С. 135.
- [14] *Palchikov E.I., Kondratyev V.I., Golikov E.V., Cheremisin A.N.* // Proc. of the XVII Intern. Synchrotron Radiation Conf. SR-2008. Novosibirsk, Russia, 2008. P. 1–24.