

На правах рукописи



Лавринович Иван Валериевич

**Конденсаторно-коммутаторные сборки с субмикросекундными
временами вывода энергии для компактных высоковольтных импульсных
генераторов**

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

- Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН
Ратахин Николай Александрович
- Официальные оппоненты:** Ремпе Николай Гербертович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», профессор кафедры физики
- Акимов Александр Валентинович, кандидат технических наук, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится 08 сентября 2016 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.031.02 при Институте сильноточной электроники СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3, ауд. 408.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИСЭ СО РАН <http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/dissertations/Lavrinovich/diss.html>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.т.н.

Юшков Г.Ю.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Техника формирования мощных электрических импульсов широко используется в тех случаях, когда необходимо в малый объем вещества на протяжении короткого промежутка времени вложить большое количество энергии. Среди многочисленных областей применения высоковольтной импульсной техники можно назвать: инерциальный термоядерный синтез; лабораторное моделирование условий, возникающих при ядерном взрыве; генерация мощных электронных пучков; исследования радиационной стойкости материалов и элементов электронной техники и другие.

Существуют различные генераторы для получения высоких плотностей энергии в нагрузке, которые по типу накопителя энергии делятся на емкостные, индуктивные, механические и химические. Основным преимуществом рассматриваемых в диссертационной работе емкостных накопителей, по сравнению с остальными, является то, что они способны обеспечивать наибольшую удельную мощность в нагрузке. Важно, что преимущества генераторов на основе быстрых емкостных накопителей проявляются не только при решении задач получения рекордных мощностей, но и при создании сильноточных генераторов со значительно меньшим уровнем мощности для проведения различных лабораторных исследований. В этом случае определяющим фактором являются не только электрические параметры генератора, но и его габаритные размеры, которые, в свою очередь, во многом определяются используемой элементной базой.

Целью работы являлось проведение исследований, направленных на разработку и создание сильноточных малоиндуктивных конденсаторов и конденсаторно-коммутаторных сборок для построения компактных сильноточных импульсных генераторов.

Основные задачи исследований:

1. Численные и экспериментальные исследования потерь энергии в ионных газовых разрядниках при наносекундных временах коммутации и амплитудах коммутируемого тока порядка 10-100 кА.
2. Определение оптимальной конфигурации обкладок высоковольтного импульсного конденсатора, применение которой обеспечивает равномерное распределение напряжения вдоль его корпуса.
3. Оптимизация электрических параметров и конструкции конденсаторно-коммутаторныхборок с целью повышения их удельного энергозапаса и выходной мощности.
4. Определение электрических параметров и разработка конструкции основных элементов компактного генератора высоковольтных импульсов, при которых обеспечивается на высокоомной нагрузке 250–300 Ом импульс напряжения амплитудой до 750 кВ, с длительностью на полувысоте порядка 100 нс без дополнительных промежуточных ступеней обострения.

Научная новизна работы:

1. На основе численных расчетов эквивалентной схемы импульсного генератора получены количественные зависимости потерь энергии в искровом газовом разряднике от параметров разрядного контура и параметров используемого разрядника.

2. Разработана конфигурация расположения обкладок конденсатора, которая позволяет равномерно распределить напряжение вдоль внешней поверхности его корпуса, благодаря чему обеспечивается стабильная работа многоазорного газового разрядника, внутри которого он размещается и совместно с которым образует конденсаторно-коммутаторную сборку.

3. Показано, что совместное применение малоиндуктивных конденсаторно-коммутаторных сборок и линейного импульсного трансформатора позволяет создать малогабаритный генератор высоковольтных импульсов, способный обеспечить на нагрузке импульс напряжения амплитудой вплоть до 750 кВ, с фронтом 50 нс и длительностью на полувысоте 70 нс без дополнительных промежуточных ступеней обострения.

Научная и практическая ценность работы:

1. Получены аналитические выражения, которые позволяют оценивать количество энергии, выделяемой в искровом газовом разряднике при коммутации емкостного накопителя на различные типы нагрузки.

2. Проведенные исследования и разработки позволили создать серию низкоиндуктивных конденсаторно-коммутаторныхборок для компактных сильноточных импульсных генераторов, которые нашли применение в работах по созданию нового диагностического оборудования в области теневой рентгенографии.

3. На основе разработанных конденсаторно-коммутаторныхборок создан ряд компактных сильноточных наносекундных генераторов, например для малогабаритного источника жесткого рентгеновского излучения, для компактных импульсных радиографов «КИНГ» и «СГХ», работающих в диапазоне мягкого рентгеновского излучения.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Полученные на основе численных расчетов эквивалентной электрической схемы импульсного генератора выражения, в которых учитываются как параметры разрядников конденсаторно-коммутаторныхборок, так и количество, схема включения и электрические параметры применяемыхборок, позволяют производить количественную оценку потерь энергии в разрядниках, совпадающую с результатами экспериментальных измерений в пределах среднеквадратичного отклонения 10 %.

2. Предложена и реализована конфигурация расположения обкладок конденсатора, которая равномерно распределяет электростатический потенциал вдоль изолятора многоазорного газового разрядника конденсаторно-коммутаторной сборки, что позволило создать компактный сильноточный импульсный генератор, способный при работе на индуктивную нагрузку 4 нГн обеспечить ток амплитудой до 170 кА при времени нарастания 120 нс.

3. Конденсаторно-коммутаторная сборка со встроенным трехэлектродным газовым разрядником, с уникальными для данного класса устройств значениями абсолютного и удельного энергозапасов – 800 Дж и 0,124 Дж/см³, соответственно, обеспечивает на согласованной нагрузке импульсную мощность вплоть до 5,5 ГВт. При работе на низкоимпедансную нагрузку сборка обеспечивает ток амплитудой до 160 кА при времени нарастания около 150 нс, что позволило создать на ее базе компактный сильноточный наносекундный генератор для источников мягкого рентгеновского излучения.

4. Совместное применение малоиндуктивного линейного импульсного трансформатора и конденсаторно-коммутаторной сборки позволило создать компактный импульсный генератор, обеспечивающий напряжение амплитудой до 750 кВ и длительностью на полувывоте 70 нс в зазоре вакуумного диода с импедансом 250–300 Ом, применяемого для генерации жесткого рентгеновского излучения.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются хорошим совпадением экспериментальных и расчетных зависимостей и их согласием с литературными данными, практической реализацией научных положений и выводов при проектировании и создании компактных сильноточных наносекундных генераторов.

Публикации. Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 18 работах, из которых **5 статей** в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, а также **13 полных текстов докладов** в трудах международных и всероссийских конференций, симпозиумов и совещаний.

Материалы работы докладывались на XV–XVIII симпозиумах по сильноточной электронике (г. Томск, 2008, 2010, 2012, 2014); на XII Международной конференции по мегагауссным полям и мощным импульсным системам (г. Новосибирск, 2008); на XXXVI Международной конференции по физике плазмы и УТС (г. Звенигород, 2009); на 12-й и 13-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» (г. Лыткарино, 2009, 2011); на Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» (Украина, г. Николаев, 2009); на 42-й Международной конференции по физике плазмы ICOPS-2015 (г. Белек, Турция, 2015) и 12-й Международной конференции по плазме газового разряда GDP-2015 (г. Томск, 2015); на научных семинарах Института сильноточной электроники СО РАН (г. Томск).

Личный вклад автора. В представленной диссертационной работе автором внесен определяющий вклад в постановку задач исследований, в разработку и создание компактных наносекундных импульсных генераторов на основе конденсаторно-коммутаторных сборок. В постановке задач, в проектировании импульсных генераторов и обсуждении результатов принимали активное участие Н.А. Ратахин, В.Ф. Федущак, С.А. Чайковский, В.К. Петин. Сборка основных узлов импульсных генераторов проводилась под руководством автора совместно с Н.В. Жаровой, А.А. Эрфортом, А.П. Артемовым, А.В. Федюниным. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации.

ции. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений с общим объемом 126 страниц, содержит 51 рисунок и 11 таблиц. Список цитируемой литературы включает 110 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и основные задачи исследований, их научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены различные подходы при построении мощных импульсных драйверов, предназначенных для работы на Z-пинч нагрузки, и компактных сильноточных генераторов, предназначенных для работы на различные низкоимпедансные нагрузки. Сделан вывод, что наиболее перспективными на сегодняшний момент являются драйверы, построенные на основе емкостных накопителей с субмикросекундными временами вывода энергии. Такими накопителями могут являться конденсаторно-коммутаторные сборки (к.к.с.), собранные из серийно выпускаемых малоиндуктивных импульсных конденсаторов и малоиндуктивных газовых разрядников. Однако, как показал проведенный анализ, максимальная импульсная мощность к.к.с., собранных из существующих малоиндуктивных газовых разрядников и серийно выпускаемых конденсаторов и способных обеспечить в согласованной нагрузке импульс мощности с временем нарастания 100 нс или меньше, не превышает 4,5 ГВт. К тому же, конденсаторы, используемые в таких к.к.с., имеют ограничения по величине максимально допустимого разрядного тока 25–50 кА. Поэтому создание компактных сильноточных импульсных генераторов, построенных на базе к.к.с., которые собраны из серийно выпускаемых конденсаторов, с субмикросекундными временами вывода энергии, трудно реализуемо. Однако потребность в таких генераторах существует, равно как и в к.к.с., которые бы обладали высокой плотностью энергии, удельной и/или максимальной импульсной мощностью и могли бы, при этом, обеспечить в низкоимпедансной нагрузке импульсные токи амплитудой сотни кА с временем нарастания около 100–200 нс.

Во второй главе рассматривается газовый искровой канал как основной элемент в цепи разрядного контура генератора, потери энергии в котором в процессе коммутации могут составлять значительную часть от общей первоначально запасенной энергии и тем самым значительно влиять на КПД всего генератора. Определить аналитически и экспериментально параметры, влияющие на потери в газовом коммутаторе, и степень их влияния было первоственной задачей.

Для наносекундных коммутаторов с амплитудой разрядного тока более 10^4 А наилучшее согласие с экспериментом дает модель, предложенная

С.И. Брагинским¹, которая описывает развитие искрового канала в газе при больших давлениях и умеренных токах, поэтому она была использована для расчета потерь энергии в газовом искровом канале.

Выражение для сопротивления канала в модели Брагинского имеет вид:

где ρ – плотность газа перед ударной волной; ξ – безразмерная величина, в общем случае являющаяся функцией времени; l_s – длина канала; σ – проводимость канала; I – ток в искровом канале.

$$R_s(t) = \left(\frac{\xi \rho}{4\pi\sigma^2} \right)^{1/3} \frac{l_s}{\int_0^t I^{2/3} dt'}, \quad (1)$$

В дифференциальной форме выражение (1) принимает вид:

$$\frac{1}{R_s^2} \frac{dR_s}{dt} = -\frac{1}{l_s} \left(\frac{4\pi\sigma^2}{\xi\rho} \right)^{1/3} I^{2/3}. \quad (2)$$

Начальное условие для уравнения (2): $R_s(t=0) \rightarrow \infty$.

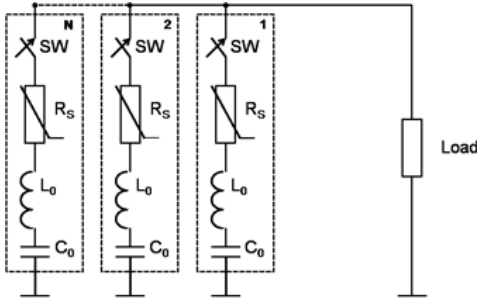


Рисунок 1 – Схема RLC-контура

Если считать, что генератор представляет собой RLC -контур, состоящий из N параллельно соединенных конденсаторно-коммутаторных сборок, (рис. 1), тогда уравнения RLC -контра для каждой из сборок имеет вид:

$$L_0 \frac{dI}{dt} = U - U_L - IR_s; \frac{dU}{dt} = -\frac{I}{C_0}, \quad (3)$$

где I и U – ток в сборке (ток через разрядник) и напряжение на конденсаторной батарее;

U_L – напряжение на нагрузке, C_0 – емкость конденсаторной батареи одной сборки, L_0 – индуктивность одной сборки, которая складывается из индуктивности конденсаторной батареи, индуктивности разрядника и индуктивности передающей линии. Перепишем систему из уравнений (2) и (3) в безразмерном виде:

$$\begin{cases} \frac{di}{d\tau} = \frac{\pi}{2}(u - u_L - ir_s) \\ \frac{du}{d\tau} = -\frac{\pi}{2}i \\ \frac{dr_s}{d\tau} = -Ar_s^2 i^{2/3} \end{cases}, \quad (4)$$

где $\tau = t/t_0$ – безразмерное время; $i = I/I_0$ – безразмерный ток; $u = U/U_0$ – безразмерное напряжение; $u_L = U_L/U_0$ – безразмерное напряжение на нагрузке; $r_s = R_s/Z_0$ – безразмерное сопротивление разрядника; $Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}$ – волновое

¹ Брагинский С.И. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1958. – Т. 34. – № 6. – С. 1548–1557.

сопротивление одной сборки; $A = \frac{1}{I_s} \left(\frac{8\pi\sigma^2}{\xi\rho} L_0^2 E_0 \right)^{1/3}$ – безразмерный параметр;

$E_0 = C_0 U_0^2 / 2$ - энергия, запасенная в конденсаторной батарее одной сборки. Масштабы времени и тока определяются выражениями: $t_0 = \pi/2 \sqrt{L_0 C_0}$, $I_0 = U_0 / Z_0$. Начальные условия при решении системы уравнений (4): $i(\tau=0)=0$; $u(\tau=0)=0$; $r_s(\tau=0)=100$.

Решение системы уравнений (4) численным методом для емкостной, индуктивной и резистивной нагрузок позволило получить зависимость относительных потерь энергии в искровом канале газового коммутатора $\Delta = E_s/E_0$ за первый полупериод тока от безразмерных параметров A и B (сплошные линии на рис. 2). Параметр B зависит от типа нагрузки, а также от количества к.к.с. и способа их подключения к нагрузке (табл. 1).

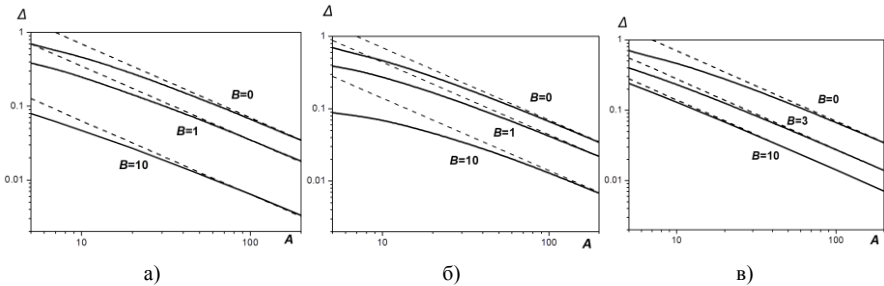


Рисунок 2 – Зависимость безразмерных потерь энергии в разряднике (за первый полупериод тока) от параметров A и B для резистивной (а), емкостной (б) и индуктивной (в) нагрузок

Аппроксимируя полученные результаты расчетов (пунктирные линии на рис. 2) с помощью выражений, зависящих от параметров A и B (табл.1), были найдены количественные зависимости относительных потерь от параметров самого разрядника и параметров разрядного контура, а также от количества и способа включения к.к.с.

Таблица 1. Относительные потери в разряднике в зависимости от типа нагрузки.

Тип нагрузки	Параллельно	Последовательно	Относительные потери в разряднике, $\Delta = E_s/E_0$
Активная	$B = \frac{NR_L}{Z_0}$	$B = \frac{R_L}{NZ_0}$	$\Delta \approx \frac{7}{A(1+B)} = \left(\frac{\xi\rho}{8\pi\sigma^2 L_0^2 E_0} \right)^{1/3} \frac{7I_s}{(1+B)}$
Емкостная	$B = \frac{NC_0}{C_L}$	$B = \frac{C_0}{NC_L}$	$\Delta \approx \frac{7}{A(1+B)^{2/3}} = \left(\frac{\xi\rho}{8\pi\sigma^2 L_0^2 E_0} \right)^{1/3} \frac{7I_s}{(1+B)^{2/3}}$
Индуктивная	$B = \frac{NL_L}{L_0}$	$B = \frac{L_L}{NL_0}$	

Применимость полученных зависимостей для оценки потерь энергии в условиях, характерных для работы разрабатываемых к.к.с., была проверена в серии экспериментов. Была исследована работа к.к.с. «НСЕІсар 80-0,25» на

малоиндуктивную нагрузку, при различных параметрах разрядного контура и коммутатора. Как показали результаты исследования (рис. 3), потери энергии в разряднике, рассчитываемые с помощью выражения (5), которое получено на основе результатов численного анализа, совпадают с результатами экспериментальных измерений в пределах 10 % среднеквадратичного отклонения.

$$\Delta_{I_{max}} \approx k \frac{7}{5+D}, \text{ где } k = 0,85, D = A(1+B)^{2/3} = \frac{1,2 \cdot 10^5 ((L_0 + NL_L)^2 E_0)^{1/3}}{I_s \cdot P^{1/3}}. \quad (5)$$

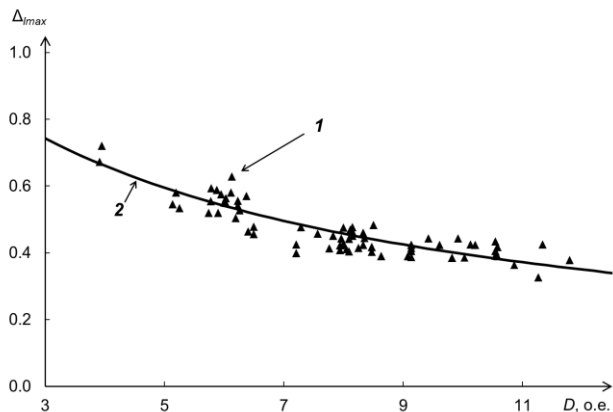


Рисунок 3 – Относительные потери в искровом канале разрядника к моменту достижения максимума тока в зависимости от безразмерного параметра D. Результаты экспериментальных измерений (1) и кривая (2), соответствующая выражению (5)

В **третьей главе** описана конструкция и представлены характеристики конденсаторно-коммутаторной сборки, построенной на базе высоковольтного импульсного конденсатора «НСЕIсар 100-0.2» и многоззорного газового разрядника (рис. 4).

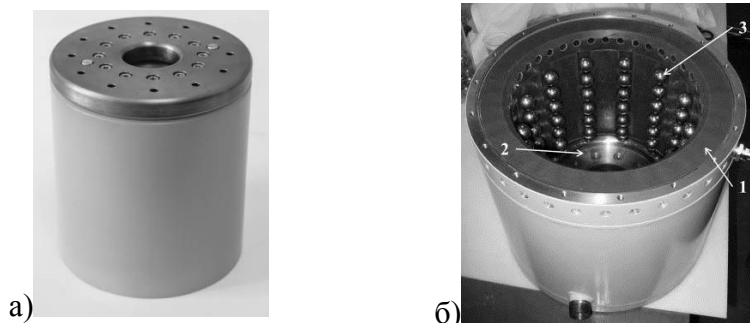


Рисунок 4 – Высоковольтный импульсный конденсатор «НСЕIсар 100-0.2» (а) и малоиндуктивный многоззорный газовый разрядник (б): 1 – диэлектрический корпус из эпоксидного компаунда, 2 – высоковольтный электрод, 3 – промежуточные электроды сферической формы

Разработанный конденсатор имеет технические характеристики, указанные в табл. 2.

Таблица 2. Основные параметры конденсатора «НСЕІсар 100-0.2»

Электрическая емкость, нФ	200
Индуктивность, нГн	16
Максимальное зарядное напряжение, кВ	100
Максимальный разрядный ток, кА	200
Запасаемая энергия, Дж	до 1000
Габаритные размеры, мм	Ø180x200
Объем конденсатора, см ³	5087
Удельная энергия, Дж/см ³	0,196

На базе конденсатора «НСЕІсар 100-0.2» разработана к.к.с., которая представляет собой сам конденсатор, расположенный внутри многоззорного разрядника с целью минимизации суммарной индуктивности сборки.

Одна из проблем, которая решалась при проектировании этой сборки, – взаимное влияние электрического поля, создаваемого электродами разрядника и обкладками крайних секций конденсатора.

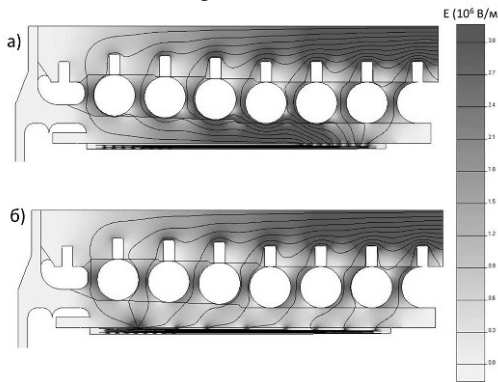


Рисунок 5 – Картина электростатического поля вблизи электродов газового разрядника и корпуса конденсатора «НСЕІсар 100-0.2» при использовании стандартной (а) и специальной (б) схем намотки

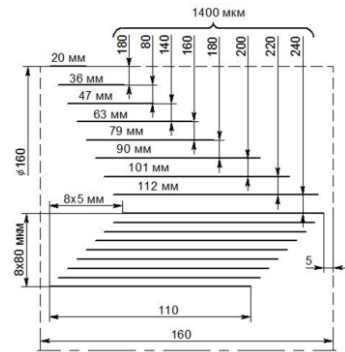


Рисунок 6 – Схема расположения обкладок крайних секций конденсатора «НСЕІсар 100-0.2»

В случае применения стандартной схемы намотки происходит неравномерное распределение потенциала вдоль поверхности изоляционного корпуса конденсатора, прилегающего к электродам разрядника (рис. 5, а). В этом случае, как показывают расчёты, максимальная напряженность поля на поверхности конденсатора вблизи одного из электродов разрядника, составляет 170 кВ/см, что в разы превышает пробивную напряженность атмосферного воздуха ($E_{пр} = 31$ кВ/см) и нарушает нормальную работу многоззорного газового разрядника.

Для решения обозначенной проблемы была разработана специальная схема расположения обкладок крайних секций конденсатора (рис. 6), примене-

ние которой позволило равномерно распределить напряжение вдоль изоляционного корпуса конденсатора, прилегающего к электродам разрядника (рис. 5, б). В результате, как показывают расчёты, применение такой схемы почти в 6,5 раз снижает максимальную напряженность поля до значений порядка 26 кВ/см, то есть ниже пробивного. Таким образом, применение специальной схемы намотки обеспечивает работоспособность всей сборки.

Сборка разработана для применения в компактном импульсном генераторе тока «ХР-100/170» (рис. 7), предназначенном для работы на нагрузку типа «Х-пинч». Параметры генератора представлены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры импульсного генератора тока «ХР-100/170»

Предельное напряжение зарядки $U_{пр}$, кВ	95
Рабочее напряжение зарядки U_0 , кВ	80–90
Емкость конденсатора, мкФ	0,2
Энергозапас при $U_{пр}$, кДж	0,9
Предельный ток, протекающий через индуктивную нагрузку (4 нГн), кА	170
Предельный ток, протекающий через нагрузку «Х-пинч», кА	150
Время нарастания тока, протекающего через нагрузку «Х-пинч», нс	130±15
Вес базового моноблока, кг	76

Как показали результаты испытаний (рис. 8), при работе на эквивалент нагрузки генератор способен обеспечить протекание в ней тока с амплитудой до 170 кА и временем нарастания 120 нс при зарядном напряжении 90 кВ. Суммарная индуктивность разрядного контура, найденная из осциллограммы тока, при этом составляет порядка 24 нГн, из которых 20 нГн – индуктивность к.к.с., а 4 нГн – индуктивность узла нагрузки.



Рисунок 7 – Базовый моноблок импульсного генератора тока «ХР-100/170»

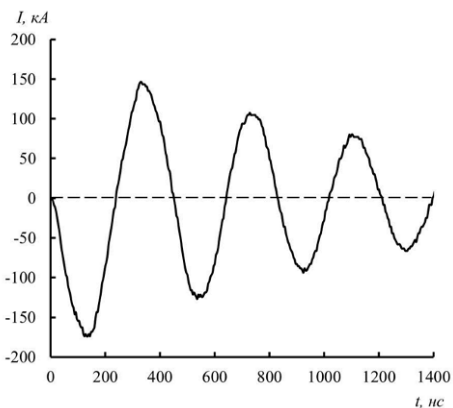


Рисунок 8 – Осциллограмма разрядного тока, зарегистрированная при работе импульсного генератора тока на эквивалент нагрузки ($L = 4$ нГн) при зарядном напряжении 90 кВ

Полученные параметры импульсного генератора тока позволяют применять его для создания источника мягкого рентгеновского излучения, при работе на нагрузку типа «X-пинч», что и было подтверждено экспериментально.

В четвертой главе описана конструкция и представлены характеристики конденсаторно-коммутаторной сборки «НСЕІсар 80-0.25», которая представляет собой высоковольтный сильноточный малоиндуктивный импульсный конденсатор с коммутатором, расположенным по центру внутри конденсатора (рис.9). Такая конструкция позволяет получить низкую суммарную индуктивность и тем самым повысить скорость вывода энергии, запасенной в конденсаторе.

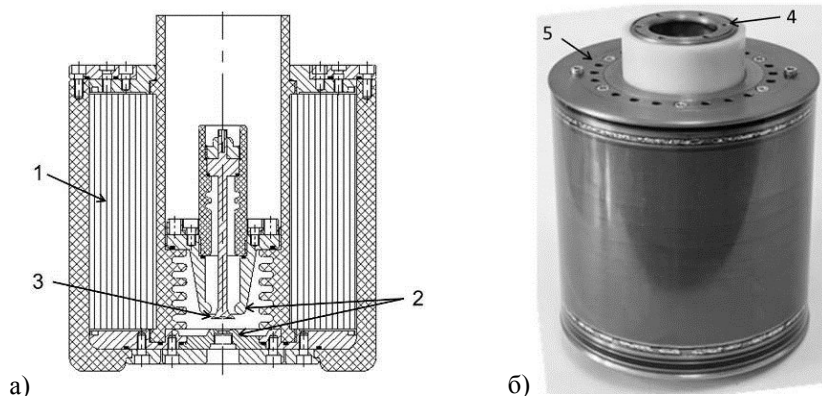


Рисунок 9 – Эскиз (а) и фотография (б) к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25». 1-высоковольтный импульсный конденсатор, 2-основные электроды разрядника, 3-управляющий электрод, 4 и 5 – выводы для подключения нагрузки.

Разработанная к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25» имеет параметры, представленные в табл. 4. Для сравнения в таблице приведены параметры аналогичных наиболее мощных сборок^{1,2}, которые применяются для построения «быстрых» ЛТД-ступеней и построены на базе конденсаторов с рабочим напряжением 100 кВ и емкостью 40 нФ (серийно выпускаемых компанией General Atomics) и различных малоиндуктивных газовых разрядников.

Как видно из сравнительной таблицы, разработанная конденсаторно-коммутаторная сборка «НСЕІсар 80-0.25» имеет наибольшие значения абсолютного и удельного энергозапаса – 800 Дж и 0,124 Дж/см³ соответственно, а также наибольшее значение максимальной выходной мощности (5,5 ГВт) среди к.к.с., способных обеспечить на согласованной нагрузке импульс мощности с фронтом 100 нс и менее. Испытания к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25» показа-

¹ A. Kim, S. Frolov, V. Alexeenko et al. // Proceedings of the IEEE Pulsed Power Conference, 2009. – P. 565-570

² J. R. Woodworth, W. A. Stygar, L. F. Bennett et al. // Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2010. – V.13. – Iss. 8. – 080401

ли, что при работе на низкоимпедансную нагрузку она способна обеспечить ток с амплитудой до 160 кА и временем нарастания до максимума порядка 150 нс. Совокупность перечисленных параметров позволяет применять сборку для создания компактных сильноточных импульсных генераторов, построенных на базе нескольких к.к.с.

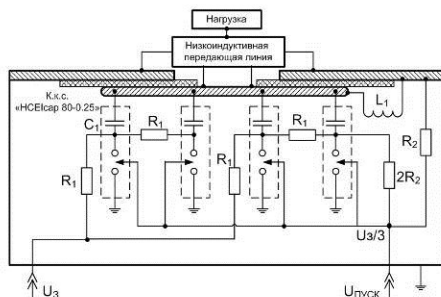
Таблица 4. Основные параметры различных к.к.с.

Параметр	НСЕIсар 80-0.25	40нФ + «FAST LTD»	40 нФ + «L3»	40 нФ + «Kinetch2»
Зарядное напряжение, кВ	80	±100	±100	±100
Суммарная емкость, нФ	250	20	20	20
Индуктивность к.к.с., нГн	30	185	155	139
Объём к.к.с., см ³	6437	7002	4964	4137
Энергозапас, Дж	800	400	400	400
Максимальная мощность, ГВт	5,5	4	4,3	4,5
t _{рmax} , нс	104	72	66	62
Удельный энергозапас, Дж/см ³	0,124	0,057	0,081	0,097
Удельная мощность, кВт/см ³	850	565	870	1100

На базе конденсаторно-коммутаторной сборки «НСЕIсар 80-0.25» был разработан компактный сильноточный наносекундный генератор, который представляет собой батарею из четырёх к.к.с. «НСЕIсар 80-0.25» (рис. 10), включенных параллельно на общую передающую линию и/или нагрузку.



а)



б)

Рисунок 10 – Выемная часть (а) и принципиальная электрическая схема (б) компактного сильноточного наносекундного генератора: 1 – к.к.с. «НСЕIсар 80-0.25»; 2 – зарядный резистор; 3 – высоковольтный делитель; 4 – трубки подачи газа

Как показали испытания компактного сильноточного наносекундного генератора в режиме короткого замыкания (КЗ), при закороченной на выходе дисковой передающей линии генератор способен обеспечить ток с амплитудой около 370 кА и временем нарастания до максимума 180 нс, при зарядном напряжении 50 кВ (рис.11).

Полученные осциллограммы позволяют оценить параметры разрядного контура генератора: $C = 1$ мкФ, $L = 11$ нГн, $R = 15$ мОм. Основные параметры генератора представлены в табл. 5.

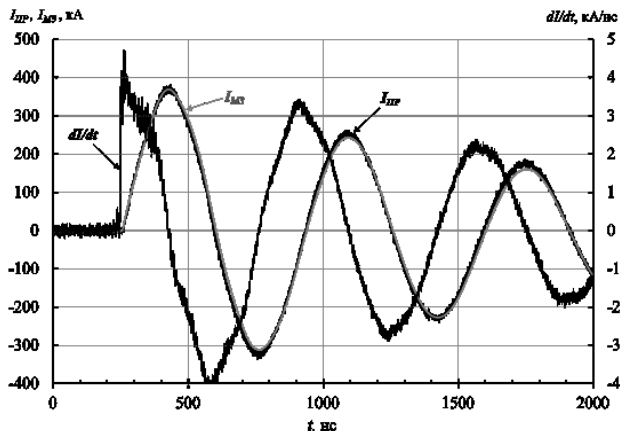


Рисунок 11 – Типичные осциллограммы сигналов с пояса Роговского (I_{IP}) и магнитного зонда (dI/dt), а также интегрированный сигнал с магнитного зонда (I_{M3}), зарегистрированные при работе генератора в режиме короткого замыкания (при зарядном напряжении 50 кВ)

Таблица 5. Технические характеристики компактного сильноточного наносекундного генератора

Максимальное зарядное напряжение, кВ	50
Энергия, запаасаемая в конденсаторах (при 50 кВ), Дж	1250
Ударная емкость генератора, мкФ	$1 \pm 10\%$
Ударная индуктивность генератора, нГн	11
Амплитуда тока в режиме КЗ, кА	370
Время нарастания тока в режиме КЗ, нс	180

Параметры тока, обеспечиваемые генератором в низкоимпедансной нагрузке, и небольшие массогабаритные характеристики позволили применить его в качестве драйвера для нагрузки типа «Х-пинч» в составе радиографов «КИНГ» и «СГХ».

В **пятой главе** представлены конструкция, основные характеристики и результаты испытаний генератора высоковольтных импульсов, построенного на основе малоиндуктивного линейного импульсного трансформатора и к.к.с. «НСЕІсар 50-0.1». Внешний вид и схематичное изображение конструкции генератора высоковольтных импульсов представлены на рис. 12.

Четыре конденсатора (поз. 2) емкостью 0,1 мкФ каждый заряжаются до напряжения 45–47 кВ, на такое же напряжение рассчитана изоляция первичного витка и ферромагнитная система каждой ступени линейного импульсного трансформатора (л.и.т.). Каждый конденсатор снабжен собственным коммутатором (поз. 1), и вместе они образуют единую конденсаторно-коммутаторную сборку. После срабатывания коммутаторов конденсаторы разряжаются одновременно на шестнадцать ступеней линейного импульсного трансформатора, каждый конденсатор на одну секцию из четырех ступеней. Ударная емкость импульсного генератора составляет: $C_{уд}=1,56$ нФ.

Ударная индуктивность импульсного генератора с учетом индуктивности конденсаторов, подводящих кабелей, первичных витков и вторичного витка л.и.т. и индуктивности узла нагрузки составляет 2,8 мкГн.

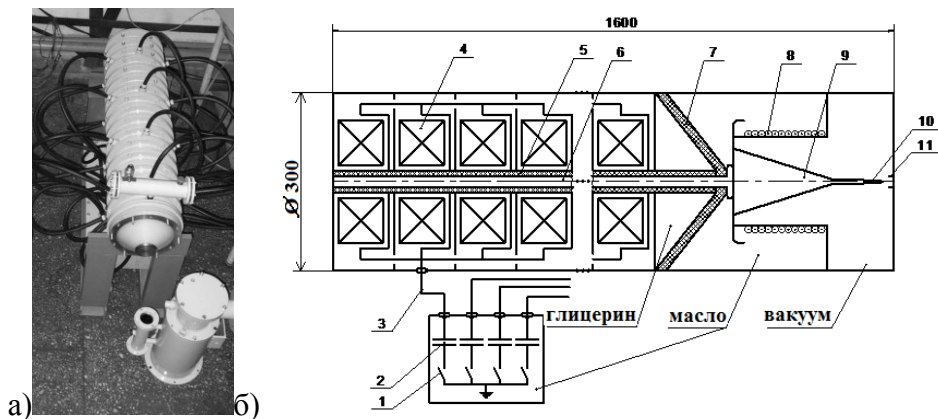


Рисунок 12 – Фото (а) и схематичное изображение конструкции (б) генератора высоковольтных импульсов и узла нагрузки: 1 – коммутатор; 2 – конденсатор; 3 – высоковольтные кабели; 4 – магнитопроводы ступени ЛИТ (всего 16 ступеней); 5 – высоковольтная изоляция вторичного витка; 6 – вторичный виток; 7 – проходной изолятор; 8 – катушка индуктивности; 9 – анододержатель; 10 – анод; 11 – катод

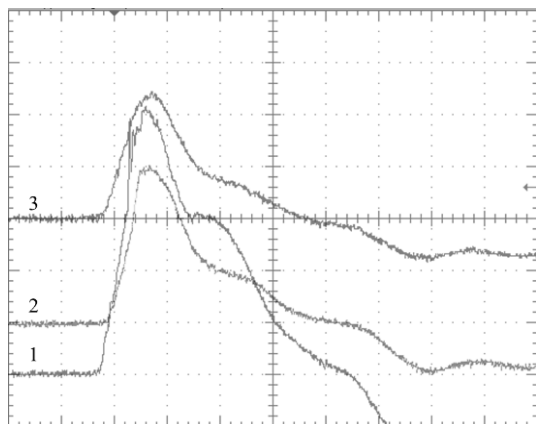


Рисунок 13 – Осциллограммы тока в эквиваленте нагрузки (1), напряжений с омического (2) и с емкостного (3) делителей напряжения. Масштабы: по вертикали – 540 А/деление (1), 213 кВ/деление (2), 270 кВ/деление (3); по горизонтали – 80 нс/деление

лучения в качестве нагрузки генератора использовалась ускорительная трубка с вакуумным электронным диодом (рис. 14).

Как показали результаты испытания, при работе на эквивалент нагрузки ($R = 250 \text{ Ом}$), в качестве которой использовался жидкостный омический делитель, выполняющий также функции датчика напряжения, генератор способен обеспечить импульс напряжения с амплитудой около 700 кВ, фронтом около 50 нс и длительностью на половине 70 нс (рис.13).

При работе генератора высоковольтных импульсов в составе малогабаритного источника жесткого рентгеновского излучения в качестве нагрузки генератора использовалась ускорительная трубка с вакуумным электронным диодом (рис. 14).

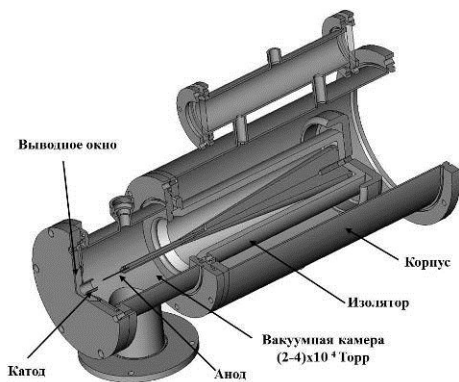


Рисунок 14 – Ускорительная трубка

мм, толщина стенки катода – 0,5 мм и расстояние между плоскостью эмитирующей кромки и анодом – 9...12 мм.

Напряжение на ускорительной трубке измерялось с помощью емкостного делителя, ток в нагрузке – поясами Роговского, а временная зависимость мощности излучения – полупроводниковым детектором СКД1-01. Измерения доз рентгеновского излучения проводились термолюминесцентными детекторами LiF с последующим «высвечиванием» их с помощью прибора ДТУ-0,1М. Для определения размеров источника рентгеновского излучения использовалась камера-обскура с диафрагмой ~300 мкм.

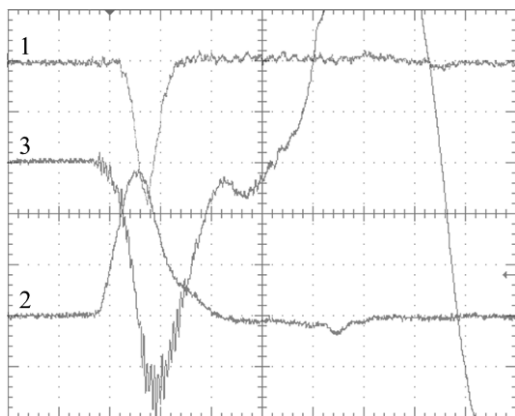


Рисунок 15 – Осциллограммы: 1 – импульса мощности излучения (СКД1_01, в отн. ед.), 2 – напряжения на нагрузке, 3 – тока в нагрузке.

Масштабы: по вертикали 270 кВ/деление (2), 540 А/деление (3); по горизонтали 80 нс/деление

В качестве катода в данном диоде использовались тонкостенные стальные трубки различного диаметра с заостренной кромкой для улучшения электронной эмиссии. В качестве анода – вольфрамовый стержень диаметром 2 мм. Кончик анода длиной порядка 5 мм заострялся для уменьшения размера источника излучения. В оптимальной для наших условий конфигурации диода диаметр эмитирующей кромки катода составлял 16

При работе на высокоомный (250–300 Ом) вакуумный диод генератор обеспечивал на диоде импульс напряжения с амплитудой до 750 кВ и длительностью 70 нс на полувысоте (рис.15). Ток в нагрузке, при этом составлял 2,5–3 кА. При таких параметрах электрического импульса на выводном окне диода регистрировался импульс рентгеновского излучения с длительностью на полувысоте 40 нс (рис.15, осц. 1). Доза на выводном окне при этом составила 5 Рентген. Измеренный размер источника излучения составил < 2 мм. Пересчет доз в предположении точечного источника излучения показал, что на расстоянии 1 м от анода экспозици-

онный размер источника излучения составил < 2 мм. Пересчет доз в предположении точечного источника излучения показал, что на расстоянии 1 м от анода экспозици-

онная доза составит 10 мР. Было установлено, что на установке можно проводить серии до 20...30 пусков без вскрытия вакуумной камеры, при этом не происходит значительного изменения характеристик источника излучения. После 20–30 пусков необходимо проверить состояние вольфрамового анода и произвести, в случае необходимости, его замену или заточку.

Определение эффективной энергии квантов показало, что при максимальном напряжении на ускорительной трубке 750 кВ эффективная энергия излучения составляет ~ 125 кэВ.

В заключении изложены основные результаты работы, обоснована достоверность результатов исследований, отмечается личный вклад автора.

Основные результаты исследований:

1. На основе численного анализа найдены и подтверждены экспериментально количественные зависимости относительных и абсолютных потерь в коммутаторе от параметров как самого коммутатора, так и разрядного контура, а также от количества параллельно или последовательно включенных сборок.

2. Разработана специальная схема намотки крайних секций конденсатора «НСЕИсар 100-0.2», которая обеспечивает равномерное распределение потенциала вдоль его внешней поверхности и, таким образом, работоспособность многоззорного газового разрядника, совместно с которым они образуют конденсаторно-коммутаторную сборку.

3. На базе конденсатора «НСЕИсар 100-0.2» разработана к.к.с., параметры которой позволили создать компактный импульсный генератор тока «ХР-100/170», способный при работе на индуктивную нагрузку $L=4$ нГн обеспечивать ток с амплитудой до 170 кА и временем нарастания 120 нс. Указанные параметры позволяют применять генератор «ХР-100/170» для работы на нагрузку типа «Х-пинч» с целью получения источника мягкого рентгеновского излучения.

4. Разработана конденсаторно-коммутаторная сборка «НСЕИсар 80-0.25», которая среди к.к.с., способных обеспечить на согласованной нагрузке импульс мощности с фронтом 100 нс и менее, имеет наибольшие значения абсолютного и удельного энергозапаса – 800 Дж и $0,124$ Дж/см³ соответственно, а также наибольшее значение максимальной выходной мощности – 5,5 ГВт. Совокупность перечисленных параметров в сочетании с высокой удельной выходной мощностью к.к.с., сравнимой с лучшими мировыми аналогами, позволяет рассматривать её в качестве базового элемента для построения субмикросекундных генераторов различного уровня мощности.

5. Разработанная к.к.с. «НСЕИсар 80-0.25» способна при работе на низкоимпедансную нагрузку обеспечивать в ней ток с амплитудой до 160 кА и временем нарастания около 150 нс, что позволяет применять сборку для создания компактных сильноточных импульсных генераторов, построенных на базе нескольких к.к.с.

6. На основе разработанной к.к.с. «НСЕИсар 80-0.25» создан компактный сильноточный наносекундный генератор, который при работе в режиме короткого замыкания способен обеспечить ток с амплитудой 370 кА и време-

нем нарастания 180 нс, что позволило применить его в качестве драйвера нагрузки типа «X-пинч» в составе радиографов «КИНГ» и «СГХ».

7. На основе линейного импульсного трансформатора и к.к.с. «НСЕIsar 50-0.1» создан компактный генератор высоковольтных импульсов, обеспечивающий на высокоомной нагрузке (250–300 Ом) импульс напряжения с амплитудой до 750 кВ и длительностью на полувывоте около 70 нс. Генератор используется в составе малогабаритного источника жесткого рентгеновского излучения (энергия квантов ~125 кэВ) с размером излучающей области менее 2 мм и длительностью рентгеновского импульса 40 нс на полувывоте.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. **Артёмов, А.П. Определение термодинамических параметров плазмы алюминиевого X-пинча** / А.П. Артёмов, А.В. Федюнин, С.А. Чайковский, В.И. Орешкин, И.В. Лавринович, Н.А. Ратахин // Письма в журнал технической физики. – 2012. – Т. 38. – Вып. 24. – С. 1–9.
2. **Лавринович, И.В. Компактный наносекундный импульсный генератор** / И.В. Лавринович, А.П. Артемов, Н.В. Жарова, В.Ф. Федущак, А.В. Федюнин, А.А. Эрфорт // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 1. – С. 63–66.
3. **Лавринович, И.В. Малогабаритный источник импульсного рентгеновского излучения для высокоскоростной радиографии** / И.В. Лавринович, Н.В. Жарова, В.К. Петин, Н.А. Ратахин, В.Ф. Федущак, С.В. Шляхтун, А. А. Эрфорт // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 3. – С. 90–96.
4. **Oreshkin, V.I. Energy loss in spark gap switches** / V.I. Oreshkin, I.V. Lavrinovich // Phys. Plasmas. – 2014. – V. 21. – No. 4. – 043513. – P. 1–8.
5. **Артемов, А.П. Синхронизируемый генератор X-пинча** / А.П. Артемов, А. С. Жигалин, И.В. Лавринович, В.И. Орешкин, Н.А. Ратахин, А.Г. Русских, А.В. Федюнин, С.А. Чайковский, А.А. Эрфорт, К.Н. Митрофанов, Е.В. Грабовский, В.В. Александров, В.П. Смирнов // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 4. – С. 92–106.

Статьи в сборниках статей и трудов конференций

1. **Feduschak, V.F. Intense pulsed x-ray source for high-speed radiography** / V.F. Feduschak, А.А. Erfort, I.V. Lavrinovich, N.A. Ratakhin, N.V. Zharova, V.K. Petin, S.V. Shlyakhtun // Proc. of 15th Int. Conf. on High Current Electronics. – Tomsk, 2008. – V. 1. – P. 232–233.
2. **Feduschak, V.F. Compact pulsed power generator** / V.F. Feduschak, N.V. Zharova, I.V. Lavrinovich, V.I. Oreshkin, A.V. Fedunin, А.А. Erfort // Proc. of 15th Int. Conf. on High Current Electronics. – Tomsk, 2008. – V. 1. – P. 303–304.
3. **Ратахин, Н.А. Разработка сильноточных импульсных конденсаторов на 100 кВ** / Н.А. Ратахин, Н.В. Жарова, И.В. Лавринович, В.Ф. Федущак,

- А.А. Эрфорт // *Материалы международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах»*. – Николаев, 2009. – С. 140.
4. **Эрфорт, А.А. Рентгеновская установка для высокоскоростной радиогрaфии** / А.А. Эрфорт, Н.А. Ратахин, В.К. Петин, С.В. Шляхтун, В.Ф. Федущак, И.В. Лавринович, Н.В. Жарова // *Материалы международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах»*. – Николаев, 2009. – С. 125.
5. **Ратахин, Н.А. Сильноточные компактные генераторы коротких импульсов рентгеновского излучения** / Н.А. Ратахин, Н.В. Жарова, И.В. Лавринович, В.К. Петин, В.Ф. Федущак, А.В. Федонин, С.В. Шляхтун, С.А. Чайковский, А.А. Эрфорт // *Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру»*. – Лыткарино, 2010. – Вып. 1. – С. 90–96.
6. **Лавринович, И.В. Генерация электронных пучков малой площади с высокой плотностью энергии на установке FLASH 800** / И.В. Лавринович, С.В. Шляхтун, А.А. Эрфорт // *Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру»*. – Лыткарино, 2012. – Вып. 1. – С. 105–106.
7. **Erfort, A.A. High-voltage pulse transformer** / A.A. Erfort, V.F. Feduschak, I.V. Lavrinovich // *Proc. 16th Int. Symp. on High Current Electronics*. – Tomsk, 2010. – P. 285–287.
8. **Erfort, A.A. Compact nanosecond pulse generator** / A.A. Erfort, V.F. Feduschak, I.V. Lavrinovich, N.V. Zharova // *Proc. of 16th International Symposium on High Current Electronics*. – Tomsk, 2010. – P. 300–302.
9. **Artyomov, A. P. Wire explosion stage during x-pinch soft x-ray source formation** / A. P. Artyomov, S. A. Chaikovsky, A. V. Fedunin, V. I. Oreshkin, I. V. Lavrinovich // *Известия высших учебных заведений. Физика.*, 2012. – Т.55. – № 10-3. – С. 23-25.
10. **Artyomov, A.P. A small-scale x-pinch-based nanosecond soft x-ray pulse radiograph** / A. P. Artyomov, M. G. Bykova, S. A. Chaikovsky, A. A. Erfort, V. F. Feduschak, A. V. Fedunin, I. V. Lavrinovich, V. I. Oreshkin, N. A. Ratakhin, A. G. Rousskikh, A. S. Zhigalin, and N. V. Zharova. // *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2012. – Т.55. – № 10-3. – С. 26–29.
11. **Лавринович, И.В. Nanosecond current generator based on a single «HCEIcap 80-0,25» capacitor-switch assembly** / I. V. Lavrinovich, N.V. Zharova, M.G. Bykova // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2012. – Т. 55. – № 10-3. – С. 253–255.
12. **Лавринович, И.В. Быстрые емкостные накопители на основе ККС и их применение в высоковольтной импульсной технике** / И.В. Лавринович, В.Ф. Федущак, А.А. Эрфорт // *Высокие технологии в современной науке и технике*. – 2013. – Т. 1. – С. 36–40.
13. **Лавринович, И.В. Numerical simulation and analysis of energy loss in a nanosecond spark gap switch** / I.V. Lavrinovich, V.I. Oreshkin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – V. 552. – Conf. 1. – 012021. – P. 1–6