

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт сильноточной электроники  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Лавринович Иван Валериевич

**КОНДЕНСАТОРНО-КОММУТАТОРНЫЕ СБОРКИ С  
СУБМИКРОСЕКУНДНЫМИ ВРЕМЕНАМИ ВЫВОДА ЭНЕРГИИ ДЛЯ  
КОМПАКТНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

Специальность 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
чл.-кор. РАН  
доктор физ.-мат. наук,  
Ратахин Н.А.

Томск – 2016

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. БЫСТРЫЕ ЕМКОСТНЫЕ НАКОПИТЕЛИ.....	12
ГЛАВА 2. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ИСКРОВЫХ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДНИКАХ	35
2.1. Различные модели искрового газового разряда.....	36
2.2. Безразмерные уравнения электрического контура.....	40
2.3. Режим короткого замыкания. ....	42
2.4. Активная нагрузка. ....	45
2.5. Емкостная нагрузка.....	46
2.6. Индуктивная нагрузка. ....	48
2.7. Последовательное включение сборок.....	51
2.8. Экспериментальные исследования .....	52
ГЛАВА 3. КОНДЕНСАТОРНО-КОММУТАТОРНАЯ СБОРКА НА БАЗЕ КОНДЕНСАТОРА «НСЕІсар 100-0.2».....	60
3.1. Высоковольтный импульсный конденсатор «НСЕІсар 100-0.2»	60
3.2. Конденсаторно-коммутаторная сборка на базе конденсатора «НСЕІсар 100-0.2».....	62
3.3. Компактный импульсный генератор тока «ХР-100/170» .....	67
ГЛАВА 4. КОМПАКТНЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ НАНОСЕКУНДНЫЙ ГЕНЕРАТОР НА БАЗЕ КОНДЕНСАТОРНО-КОММУТАТОРНОЙ СБОРКИ «НСЕІсар 80-0.25».....	73
4.1. Конденсаторно-коммутаторная сборка «НСЕІсар 80-0.25».....	73
4.2. Компактный сильноточный наносекундный генератор на базе к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25».....	83

4.3. Компактный импульсный радиограф мягкого рентгеновского диапазона «КИНГ».....	88
4.4. Компактный импульсный радиограф «СГХ» (Синхронизируемый генератор X-пинча) .....	90
ГЛАВА 5. ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА БАЗЕ КОНДЕНСАТОРНО-КОММУТАТОРНОЙ СБОРКИ И ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	94
5.1. Конструкция генератора.....	94
5.2. Генерация рентгеновского излучения. ....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	111
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	126

## ВВЕДЕНИЕ

Техника формирования мощных электрических импульсов [1, 2] 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 [3–9]. Все перечисленные выше приложения в настоящее время активно развиваются и являются неотъемлемой частью современной науки, поэтому тематика диссертационной работы, направленная на разработку и создание импульсных сильноточных генераторов и их конструктивных узлов, является, безусловно, **актуальной**.

Существуют различные генераторы для получения высоких плотностей энергии в нагрузке, которые по виду накопителя энергии делятся на емкостные, индуктивные, механические, химические. Основным преимуществом рассматриваемых в диссертационной работе емкостных накопителей, по сравнению с остальными, является то, что они способны обеспечивать наибольшую удельную мощность в нагрузке. Это позволяет создавать эффективные генераторы с рекордной мощностью и иные 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 зависят от используемой элементной базы.

В связи с вышеизложенным, **задачи** диссертационной работы:

- 1) численные и экспериментальные исследования потерь энергии в искровых газовых разрядниках при наносекундных временах коммутации и амплитудах коммутируемого тока порядка 10–100 кА;
- 2) определение оптимальной конфигурации обкладок высоковольтного импульсного конденсатора, применение которой обеспечит равномерное распределение напряжения вдоль его корпуса;
- 3) оптимизация электрических параметров и конструкции конденсаторно-коммутаторных сборок с целью повышения их удельного энергозапаса и выходной мощности;
- 4) определение электрических параметров и конструкции основных элементов компактного генератора высоковольтных импульсов, при которых он обеспечит на высокоомной нагрузке 250–300 Ом импульс напряжения с амплитудой до 750 кВ и длительностью на полувывоте порядка 100 нс без дополнительных промежуточных ступеней обострения.

Задачи, которые необходимо было решить при разработке конденсаторно-коммутаторных сборок с субмикросекундными временами вывода энергии для создания компактных сильноточных импульсных генераторов, определили **цель диссертационной работы**: проведение исследований, направленных на разработку и создание сильноточных малоиндуктивных конденсаторов и конденсаторно-коммутаторных сборок для построения компактных сильноточных импульсных генераторов.

**Научная новизна** работы заключается в том, что:

- 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 многозазорного газового разрядника, внутри которого он размещается и совместно с которым образует конденсаторно-коммутаторную сборку;

3) показано, что совместное применение малоиндуктивных конденсаторно-коммутаторныхборок 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 состоит в том, что:

- 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.

Результаты, полученные в работе, нашли применение в ряде учреждений России: ФИАН (г. Москва); ГНЦ РФ ТРИНИТИ (г. Троицк); ИГиЛ СО РАН (г. Новосибирск); Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), Национальный исследовательский Томский политехнический университет, (г. Томск).

**Методы диссертационного исследования.** Для достижения целей работы и решения поставленных задач были использованы следующие методики: численные методы решения систем дифференциальных уравнений с использованием компьютерных вычислительных программ, численные оценки и моделирование, осциллография импульсных токов с помощью поясов Роговского и магнитного зонда и импульсных напряжений с помощью резистивных и емкостных делителей напряжения.

**Содержание диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и списка цитируемой литературы. Общий объем – 127 страниц машинописного текста, 51 рисунок, 11 таблиц и 109 наименований в списке цитируемой литературы.

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

В **первой главе** рассмотрены различные подходы при построении мощных импульсных установок, предназначенных для работы на Z-пинч нагрузку, 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 субмикросекундным выводом энергии. Такими накопителями могут являться конденсаторно-коммутаторные сборки, построенные из серийно выпускаемых малоиндуктивных импульсных конденсаторов и малоиндуктивных газовых разрядников. Однако, как показал анализ, единственными серийно выпускаемыми конденсаторами, удельный запас энергии которых выше  $0,10 \text{ Дж/см}^3$  и которые способны обеспечить в согласованной нагрузке мощность около 4 ГВт с временем нарастания 100 нс или меньше при коммутации с помощью существующих малоиндуктивных газовых разрядников, являются конденсаторы GA серии 35xxx и 31xxx.

Конденсаторно-коммутаторные сборки (к.к.с.), построенные с использованием таких конденсаторов ограничены их рабочими характеристиками (максимальной амплитудой разрядного тока), что не позволяет на их основе создать новые к.к.с. с более высокой удельной и абсолютной выходной мощностью, хотя потребность в таких к.к.с. существует.

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 были первостепенной задачей.

В **третьей главе** описаны конструкция и характеристики конденсаторно-коммутаторной сборки, построенной на базе высоковольтного импульсного конденсатора «НСЕІсар 100-0.2» и многоззорного газового разрядника. Сборка разработана для применения в компактном импульсном генераторе тока «ХР-100/170», предназначенном для работы на X-пинч нагрузку, конструкция, принцип работы и основные параметры которого также, описаны в этой главе.

В **четвертой главе** описаны конструкция и характеристики конденсаторно-коммутаторной сборки «НСЕІсар 80-0.25», которая нашла применение в качестве базового элемента в составе компактного сильноточного наносекундного генератора тока. Параметры тока, обеспечиваемые генератором в низкоимпедансной нагрузке, и небольшие массогабаритные характеристики позволили применить его в качестве драйвера x-пинч нагрузки в составе нескольких радиографов, конструкция и характеристики которых также описаны в этой главе.

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». Генератор работает в составе малогабаритного источника жесткого рентгеновского излучения (энергия квантов  $\sim 125$  кэВ) с размером излучающей области менее 2 мм и длительностью рентгеновского импульса 40 нс на полувысоте.

В **заключении** изложены основные результаты работы, отмечается личный вклад автора.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Полученные на основе численных расчетов эквивалентной электрической схемы импульсного генератора выражения, в которых учитываются как параметры разрядников конденсаторно-коммутаторных сборок, 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/см<sup>3</sup>, 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 полувысоте 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.

Основные материалы диссертационной работы опубликованы в **18** работах, включая **5 статей** [66, 93, 95, 101, 105] в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, а также **13 полных текстов докладов** в трудах международных и всероссийских конференций, симпозиумов и совещаний [10, 59, 62, 65, 86, 88–91, 93, 99, 100, 104].

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 42ой международной конференции по физике плазмы ICOPS-2015 (г. Белек, Турция, 2015) и международной конференции по плазме газового разряда GDP-2015 (г. Томск, 2015); на научных семинарах Института сильноточной электроники СО РАН (г. Томск).

## Глава 1. БЫСТРЫЕ ЕМКОСТНЫЕ НАКОПИТЕЛИ

Ограниченные запасы естественных источников энергии на Земле, таких как углеводороды, гидроэнергия, атомная энергия, ставят человечество перед проблемой поиска и освоения альтернативных источников энергии [11]. Распределение вырабатываемой и потребляемой электроэнергии в настоящее время приведено на рис. 1.1 [12].

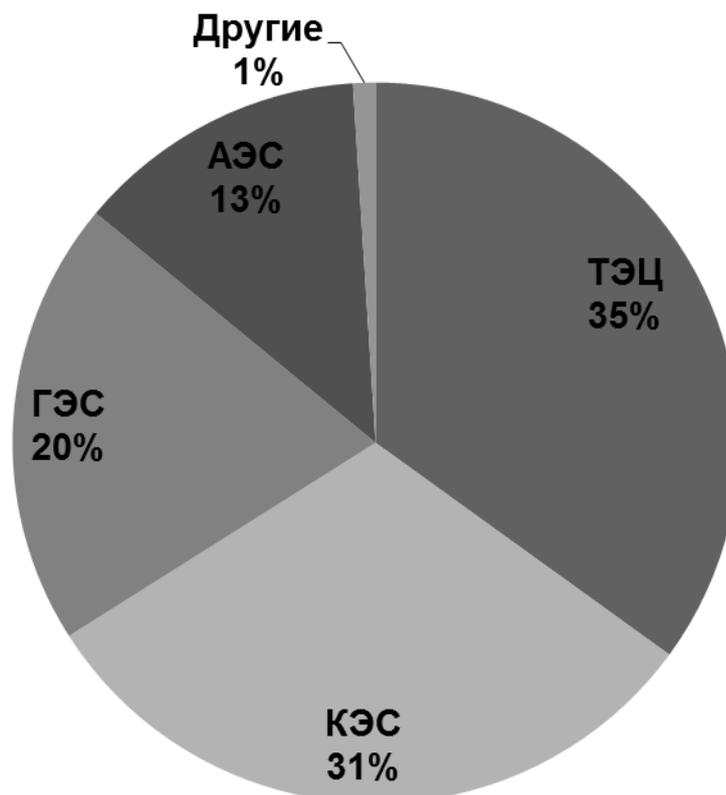


Рис. 1.1. Структура источников вырабатываемой электроэнергии. ТЭЦ – тепловые электростанции, КЭС – конденсационные электростанции, ГЭС – гидроэлектростанции, АЭС – атомные электростанции

Видно, что порядка 66 % вырабатываемой электроэнергии производится электростанциями, работающими на углеводородном топливе, 20 % вырабатывается гидроэлектростанциями, 13 % – атомными электростанциями. На все остальные источники энергии, так называемые альтернативные (солнечная, ветровая, термальная, приливная и т. п.), приходится не более 1 %.

Запасов углеводородного топлива (нефть, уголь, газ), при существующих темпах потребления, по оценкам экспертов хватит на 50–100 лет [13]. Прироста выработки электроэнергии за счет гидроэнергетики не будет, т. к. практически все реки, пригодные для установки на них гидроэлектростанций, уже освоены. Единственное освоенное направление, позволяющее увеличить выработку электроэнергии, это атомные электростанции, создание которых имеет свои трудности и опасности для окружающей среды [12]. Таким образом, перед человечеством достаточно остро стоит проблема поиска источника энергии, который был бы значительно более энергоемким по сравнению с углеводородной и атомной энергией, достаточно большим по энергозапасу и не загрязняющим окружающую среду.

Одним из таких направлений следует назвать управляемый термоядерный синтез. Идея получения энергии с помощью управляемого термоядерного синтеза была предложена О.А. Лаврентьевым еще в 1950 г. [14]. В этом направлении в России и ведущих странах мира ведутся обширные исследования. Не рассматривая различные разрабатываемые направления в области управляемого термоядерного синтеза, можно сказать, что одним из главных направлений является так называемый инерциальный термоядерный синтез [15]. Исследования возможности осуществления инерциального термоядерного синтеза распадаются как минимум на три – пучковый (электронный или ионный), лазерный и лайнерный (в геометрии Z-пинча) [15]. Во всех этих направлениях в основе лежит принцип достаточно медленного запаса энергии и быстрого перекачивания ее в реактор для осуществления, в соответствии с исследуемым принципом, термоядерной реакции. Одним из наиболее перспективных направлений исследования считается лайнерный метод [4–7], суть которого заключается в сжатии некой токопроводящей оболочки, внутри которой находится дейтерий-тритиевая смесь. При сжатии этой оболочки до определенного размера за счет протекания по ней

многомегаамперного тока в нагретой и плотной дейтерий-тритиевой смеси может начаться термоядерная реакция [7].

Исследования последних лет [16, 17] показали, что для зажигания дейтерий-тритиевой мишени необходимо в рентгеновском излучении получить энергию 5–10 МДж за время  $\sim 10$  нс, для чего в лайнерной нагрузке необходимо обеспечить электрическую мощность порядка 1000 ТВт с фронтом около 100 нс.

Развитие мощной импульсной техники, одной из основных задач которой является получение обозначенной мощности электрической энергии в нагрузке, предопределяет успешность реализации лайнерного направления ИТС.

Существуют различные генераторы для получения высоких мощностей электрической энергии в нагрузке, которые по виду накопителя энергии делятся на емкостные, индуктивные, механические, химические. Несмотря на то, что емкостные накопители имеют наименьшую удельную энергию, по сравнению с остальными, они способны обеспечивать наибольшую удельную мощность, благодаря наименьшему внутреннему сопротивлению и наименьшему времени вывода энергии (см. табл. 1.1.).

Таблица 1.1. Характеристики накопителей энергии разного типа [18]

Тип накопителя	Энергия в единице объема, Дж/дм <sup>3</sup>	Предельный ток, А/дм <sup>3</sup>	Мощность в импульсе, ВА/дм <sup>3</sup> или Вт/дм <sup>3</sup>
Аккумуляторы	$(1-5) \cdot 10^5$	$(3-10) \cdot 10^2$	$(3-10) \cdot 10^2$
Ударные генераторы	$10^4-10^5$	3–10	$(3-10) \cdot 10^4$
Индуктивные накопители	$(1-4) \cdot 10^4$	1–10	$(1-10) \cdot 10^5$
Конденсаторы	50–300	$10^4$	$(1-5) \cdot 10^8$

Благодаря этому, драйверы на основе емкостных накопителей [19–27] получили наибольшее распространение в мире, и на одном из таких генераторов (установка «ZR», г. Сандия, США с амплитудой тока до 25 МА [24]) была получена рекордная, на сегодня, мощность. Электрическая мощность «ZR» составляет 60 ТВт, однако и её недостаточно для реализации

управляемого термоядерного синтеза, а потому существует потребность в установках нового поколения, способных обеспечить в нагрузке требуемый уровень мощности.

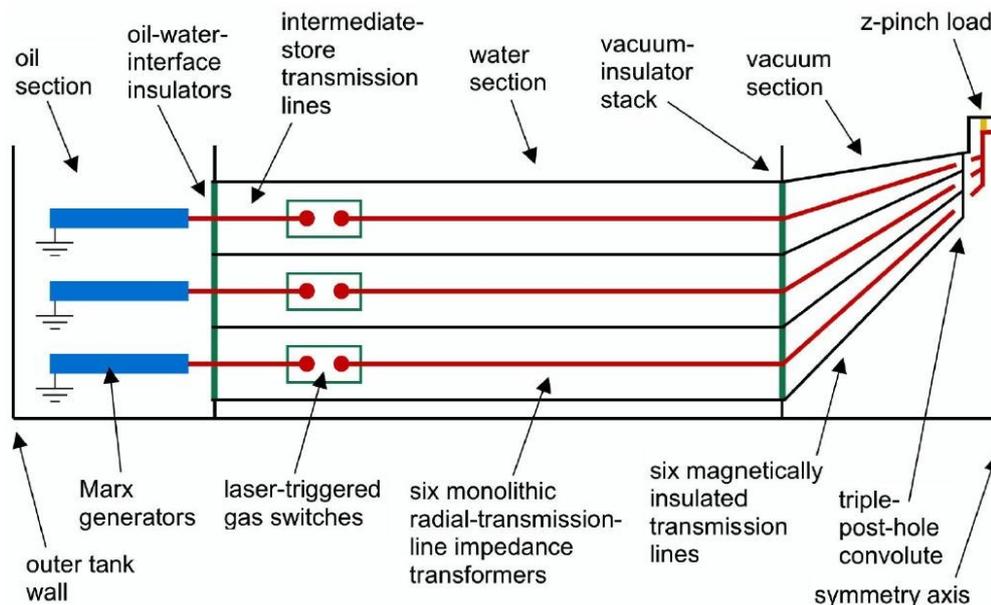
Среди всего многообразия генераторов на основе емкостных накопителей, способных обеспечить в нагрузке импульс электрической мощности с обозначенным фронтом порядка 100 нс, можно выделить два, принципиально отличающихся друг от друга типа.

В генераторах первого типа применяются «медленные» емкостные накопители, не способные обеспечить необходимую скорость вывода энергии и, как следствие, необходимую мощность непосредственно в нагрузку. Поэтому в генераторах такого типа применяются дополнительные промежуточные накопители энергии, увеличивающие мощность до заданного уровня. Как правило, в качестве промежуточного накопителя энергии используют жидкостные формирующие линии. К генераторам такого типа относятся практически все мощные генераторы прошлого столетия, такие как «Блэк-Джек-5» [19], «Proto-II» [20], «Saturn» [21], «PBFA-II» [22], «Z» [23, 24], Сандиа, США ; «АНГАРА-5-1» [25], ТРИНИТИ, г. Троицк, Россия; «МИГ» [26] и «ГИТ-16» [27], ИСЭ СО РАН, г. Томск, Россия, и некоторые современные, например, строящийся в настоящее время термоядерный комплекс «БАЙКАЛ», ТРИНИТИ, г. Троицк, Россия [28].

В генераторах второго типа применяются «быстрые» емкостные накопители, способные обеспечить заданный фронт мощности непосредственно в нагрузке без дополнительных ступеней сжатия. К таким генераторам можно отнести практически все «быстрые» ступени LTD (от англ. Linear Transformer Driver) [29–33] и построенные на их основе драйверы [34–36]. LTD-генератор, также как и линейный индукционный ускоритель (ЛИУ), линейный импульсный трансформатор (ЛИТ), сумматор индуктивного напряжения (IVA - Inductive Voltage Adder), относится к классу индукционных генераторов. Работа индукционных генераторов основана на законе электромагнитной индукции

М. Фарадея, согласно которому электродвижущая сила в замкнутом контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока, проходящего через этот контур. В момент срабатывания индукционных генераторов их индукторы имеют нулевой потенциал, что выгодно отличает их от генераторов импульсного напряжения (ГИН) Маркса. LTD-генератор, подобно IVA и ЛИТ, состоит из нескольких индукторов, получивших название «LTD-ступени», вдоль оси которых расположен центральный электрод. LTD-ступень, в отличие от индукторов ЛИУ, IVA и ЛИТ, включает в себя первичный накопитель энергии.

Перспективность/преимущества второго подхода при построении генераторов петаваттного уровня мощности была продемонстрирована в работе [37], в которой приводится сравнение двух проектов z-pinch-ускорителей петаваттного уровня мощности, один из которых построен на базе генератора Маркса (рис. 1.2), то есть относится к первому типу, а другой – на основе ступеней LTD (рис. 1.3), то есть относится ко второму типу.



*Рис. 1.2. Принципиальная схема построения ускорителей на базе ГИН Маркса. Предельные параметры установки [37]: диаметр установки – 104 м, ток нагрузки – 50 МА, длительность импульса – 95 нс, энергия, запасенная в конденсаторах генераторов Маркса, – 98 МДж, энергия, переданная в нагрузку, – порядка 35 МДж*

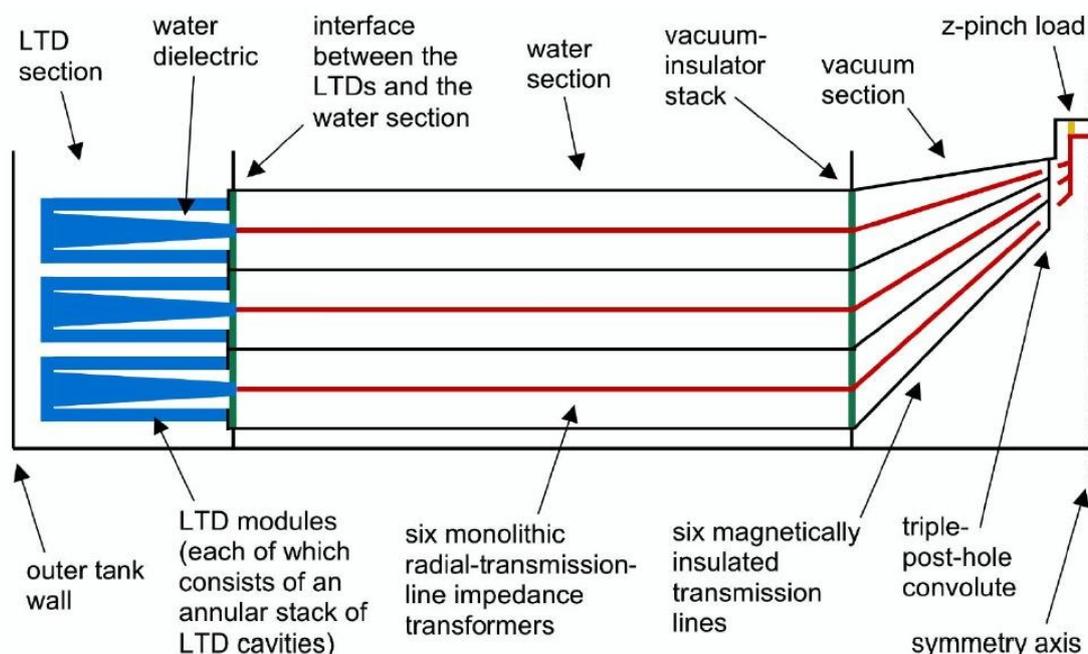


Рис. 1.3. Принципиальная схема ускорителей на базе LTD-ступеней. Предельные параметры установки [37]: диаметр установки 104 м, ток нагрузки – 65 МА, длительность импульса – 95 нс, энергия, запасенная в конденсаторах LTD, – 182 МДж, энергия, переданная в нагрузку, – порядка 73 МДж

Видно, что в сравнении с генераторами Маркса применение LTD-ступеней позволяет получить более эффективную передачу энергии от первичного накопителя в нагрузку, а самое главное – при одних и тех же габаритах установки достигаются большие значения параметров: например, мощность установки с применением ГИН – 500 ТВт, с применением LTD – 1000 ТВт. Кроме этого, надежность работы установки с применением LTD значительно выше, чем надежность установки на основе ГИН [37], что связано с наличием в конструкции последней 600 (шестисот) мультимегавольтных элегазовых разрядников, управляемых лазером, чья надежность существенно меньше, чем у воздушных разрядников со значительно меньшим рабочим напряжением (190 кВ), используемых в LTD-ступенях.

Преимущества драйверов на основе быстрых емкостных накопителей могут проявляться 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 таких случаях одним из определяющих факторов являются не только электрические параметры драйвера, но и его габаритные размеры. Например, при проведении различных лабораторных исследований по изучению поведения вещества в экстремальном состоянии требуются компактные драйверы, как для получения данного состояния, так и для его диагностики с помощью просвечивающего рентгенографического оборудования.

Первые работы, направленные на создание компактного драйвера для работы с нагрузкой в виде X-пинча [38], продемонстрировали перспективность применения быстрых емкостных накопителей для решения этой задачи, а именно, показали, что лабораторные установки гигаваттного уровня мощности с характерным временем нарастания  $\sim 100$  нс, построенные на основе быстрых емкостных накопителей – конденсаторно-коммутаторных сборок [38], могут быть значительно компактнее, чем аналогичные [39], но построенные на основе серийно выпускаемых конденсаторов с более медленным выводом энергии. Отличие в габаритах не в пользу последних связано с наличием в их конструкции дополнительных элементов – промежуточных накопителей энергии и ключей, необходимых для обострения мощности в нагрузке.

Итак, в случае необходимости получения в нагрузке электрического импульса мощности уровня от гигаватт до петаватт с временем нарастания около 100 нс, драйверы на основе быстрых емкостных накопителей являются более перспективными.

Основным элементом такого драйвера, независимо от уровня его выходной мощности, является конденсаторно-коммутаторная сборка (к.к.с.), параметры которой и определяют параметры всего генератора.

Главное требование, предъявляемое к к.к.с., это возможность генерировать импульс электрической мощности с фронтом нарастания порядка 100 нс при работе на согласованную нагрузку. При этом немаловажными

являются такие характеристики, как удельная мощность, удельная энергия импульсного конденсатора, а также надежность и эффективность всей сборки. Данные характеристики крайне важны, поскольку в совокупности определяют общее количество к.к.с., необходимых для построения установки на обозначенные параметры, а также архитектуру, габаритные размеры, надежность работы и прочие параметры всей установки.

Рассмотрим подробно один из основных элементов к.к.с. – высоковольтный импульсный конденсатор. А также проведем сравнительный анализ серийно выпускаемых конденсаторов с целью выявления среди них приемлемых для построения к.к.с., способных обеспечить в согласованной нагрузке импульс мощности с временем нарастания до максимума 100 нс.

Отметим, что разработка новых изоляционных пленок и пропитывающих жидкостей с улучшенными диэлектрическими характеристиками позволили существенно повысить плотность энергии, запасаемой в высоковольтных импульсных конденсаторах за последнее десятилетие (рис. 1.4).

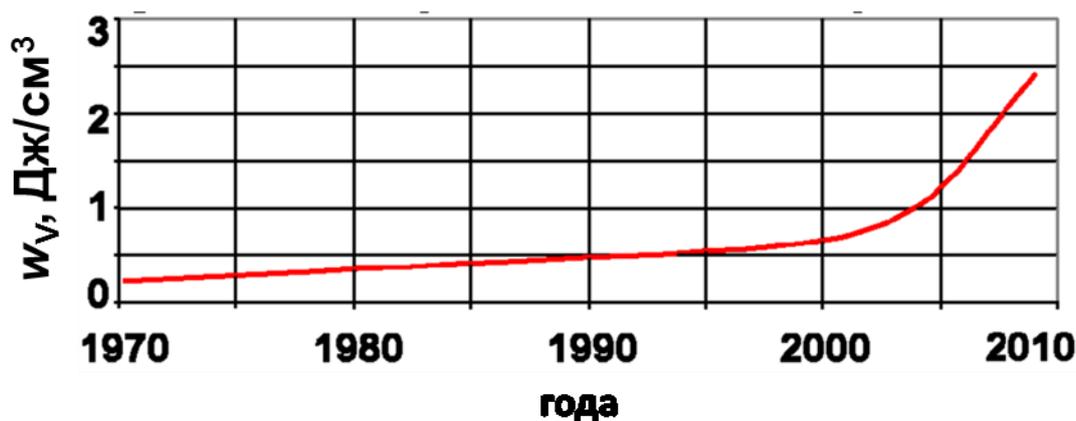


Рис. 1.4. Изменение величины плотности энергии импульсных конденсаторов в период 1970–2010 гг. [40]

Например, для конденсаторов с металлизированными обкладками, в которых используется принцип «самовосстановления», достигнута плотность энергии более 3 Дж/см<sup>3</sup> [41]. Однако конденсаторы данного типа имеют существенные ограничения по скорости разряда или амплитуде разрядного тока

на единицу длины намотки, которые связаны с относительно небольшой толщиной обкладки, составляющей доли микрон. Поэтому конденсаторы с металлизированными обкладками не предназначены для работы в импульсном режиме с субмикросекундными временами разряда.

У конденсаторов с фольговыми обкладками, толщина которых составляет несколько микрон, разрядный ток теоретически ограничен лишь собственной последовательной индуктивностью и импедансом разрядного контура. В некоторых случаях амплитуда разрядного тока также может быть ограничена динамической устойчивостью внутренних соединений секций и групп секций, а также контактных соединений. Конденсаторы с фольговыми обкладками наиболее предпочтительны для работы в импульсном режиме с субмикросекундными временами разряда.

Характеристики и область применения конденсаторов напрямую зависят от типа диэлектрика и конфигурации обкладок и токоведущих элементов, применяемых при их изготовлении.

Конденсаторы с фольговыми обкладками по типу диэлектрика условно можно разделить на три подгруппы: 1) конденсаторы с бумажной изоляцией, 2) с пленочной изоляцией, 3) с комбинированной (бумажно-пленочной) изоляцией.

Конденсаторы первого типа предназначены для работы, требующей высокого напряжения (до 100 кВ), большого тока (до 1 МА), большого реверса (>20%) или сочетание этих факторов, но при низкой частоте следования циклов «заряд-разряд». Для них характерна наибольшая плотность энергии, достигающая 0,66 Дж/см<sup>3</sup>[42], однако ресурс при такой плотности энергии, не превышает нескольких тысяч.

В конденсаторах второго типа обычно применяются неполярные пленки, например полипропиленовая, и неполярные пропитывающие жидкости, что обеспечивает минимальную величину «эквивалентного последовательного сопротивления» (ESR- Equivalent Series Resistance) и позволяет применять их

при высокой частоте повторения импульсов. Однако конденсаторы данного типа более чувствительны к реверсу напряжения и имеют существенно меньшую плотность энергии (не более  $0,1 \text{ Дж/см}^3$ ) по сравнению с бумажными конденсаторами.

Конденсаторы с комбинированной изоляцией занимают промежуточное место между бумажными и пленочными конденсаторами по удельной энергии, которая соответствует диапазону  $0,1-0,3 \text{ Дж/см}^3$ . При этом они имеют меньшую ESR, чем у бумажных конденсаторов, что позволяет применять их при большей частоте повторения импульсов. Также они имеют наибольшую надежность и ресурс по сравнению с бумажными и пленочными конденсаторами. Сочетание характеристик конденсаторов данного типа наилучшим образом подходит для работы в импульсном режиме с субмикросекундным временем разряда.

Проведем сравнительный анализ характеристик серийно выпускаемых высоковольтных импульсных конденсаторов некоторых отечественных и зарубежных производителей с целью выявления конденсаторов, способных обеспечить быстрый вывод энергии за время порядка  $100 \text{ нс}$  на согласованной и/или низкоомной нагрузке. При анализе не рассматриваются керамические конденсаторы, так как они, как и пленочные конденсаторы, предназначены для работы на высоких частотах, но значительно уступают конденсаторам с комбинированной изоляцией по плотности запасаемой энергии. Для оценки выбраны лишь те компании, о продукции которых имеется информация, достаточная для проведения сравнительного анализа. В их число попали практически все производители высоковольтных импульсных конденсаторов в России: ОАО «КВАР» (г. Серпухов) [43], ЗАО «Русская технологическая группа 2» (г. Москва) (далее РТГ2) [44], ЗАО «Элкод» (г. Санкт-Петербург) [45]; а также одна из лидирующих мировых компаний в данной области – General Atomics (США) (далее GA) [46]. Продукция других зарубежных компаний, производящих высоковольтные импульсные конденсаторы, таких как AVX (Великобритания), Aerovox (США), Epcos (Германия), Vishay

(Германия), IkarSpa (Италия), RECTIPHASE CAPACITORS (Индия), Shanghai Pluspark Electronics Co. (Китай), не рассматривалась по причине отсутствия достаточной для анализа информации в открытых источниках.

При проведении анализа использованы следующие характеристики конденсаторов:

$C_0$  – электрическая емкость конденсаторов;

$U_0$  – максимальное рабочее напряжение;

$L_0$  – собственная индуктивность конденсатора;

$I_M$  – максимально допустимый разрядный ток;

$V$  – объём конденсатора, который вычислялся по габаритным размерам

Далее для каждого конденсатора определяем его удельную энергию:

$$w_V = \frac{C_0 U_0^2}{2V}, \quad (1.1)$$

и удельную максимальную мощность, получаемую на согласованной нагрузке

$$R_H = 1,1\sqrt{L_{PK}/C_0} :$$

$$P_{max} = \frac{0,3U_0^2}{V\sqrt{L_{PK}/C_0}}, \quad (1.2)$$

где  $L_{PK} = L_0 + L_{sw} + L_H$  – индуктивность разрядного контура, включающая  $L_0$  – собственную индуктивность конденсатора,  $L_{sw}$  – суммарная индуктивность коммутатора (и токоведущих шин/проводов) и  $L_H$  – индуктивность нагрузки.

Сравнение высоковольтных импульсных конденсаторов удобно проводить на плоскости  $P_{max}$  в зависимости от  $w_V$ , где каждому типу конденсатора соответствовала точка с координатой, равной удельной энергии  $w_V$  на оси абсцисс, и с координатой, равной удельной максимальной мощности  $P_{max}$  на оси ординат (см. рис. 1.5).

Данная система координат выбрана для сравнения, так как она позволяет сравнить конденсаторы не только по удельным показателям, но и по временным характеристикам, например по времени нарастания мощности до максимума на согласованной нагрузке  $t_{Pmax}$ , которое определяется выражением

$$t_{P_{\max}} \approx 1,18 \sqrt{L_{\text{PK}} C_0} = \frac{1,18 \cdot 0,6 \cdot w_V}{P_{\max}} = 0,708 \frac{w_V}{P_{\max}} \quad (1.3)$$

Так как одним из обязательных требований для к.к.с. является обеспечение фронта мощности порядка 100 нс при работе на согласованную нагрузку, построим на плоскости прямую, соответствующую этому условию:

$$P_{\max} = 0,708 \frac{w_V}{t_{P_{\max}}} = \frac{0,708}{100 \cdot 10^{-9}} w_V = 0,708 \cdot 10^7 \cdot w_V \text{ Вт/см}^3 \quad (1.4)$$

Тогда конденсаторы, для которых точки расположены ниже этой прямой на плоскости « $p_{\max} \times w_V$ », не могут обеспечить максимальную мощность на согласованной нагрузке за время 100 нс или менее, а значит, непригодны для построения быстрых к.к.с.

Поскольку величина максимальной удельной мощности зависит от индуктивности разрядного контура, которая включает кроме собственной индуктивности конденсатора индуктивность коммутатора, токоведущих шин и нагрузки, необходимо оценить значение этих параметров. Однако в первом приближении будем учитывать только собственную индуктивность конденсатора и примем  $L_{\text{PK}}=L_0$ , то есть удельная собственная максимальная мощность конденсатора на согласованной нагрузке  $R_0 = 1,1 \sqrt{L_0 / C_0}$  равна:

$$P_0 = \frac{0,3U_0^2}{V \sqrt{L_0 / C_0}}. \quad (1.5)$$

Тогда плоскость « $p_0 \times w_V$ » будет иметь вид, представленный на рис. 1.5.

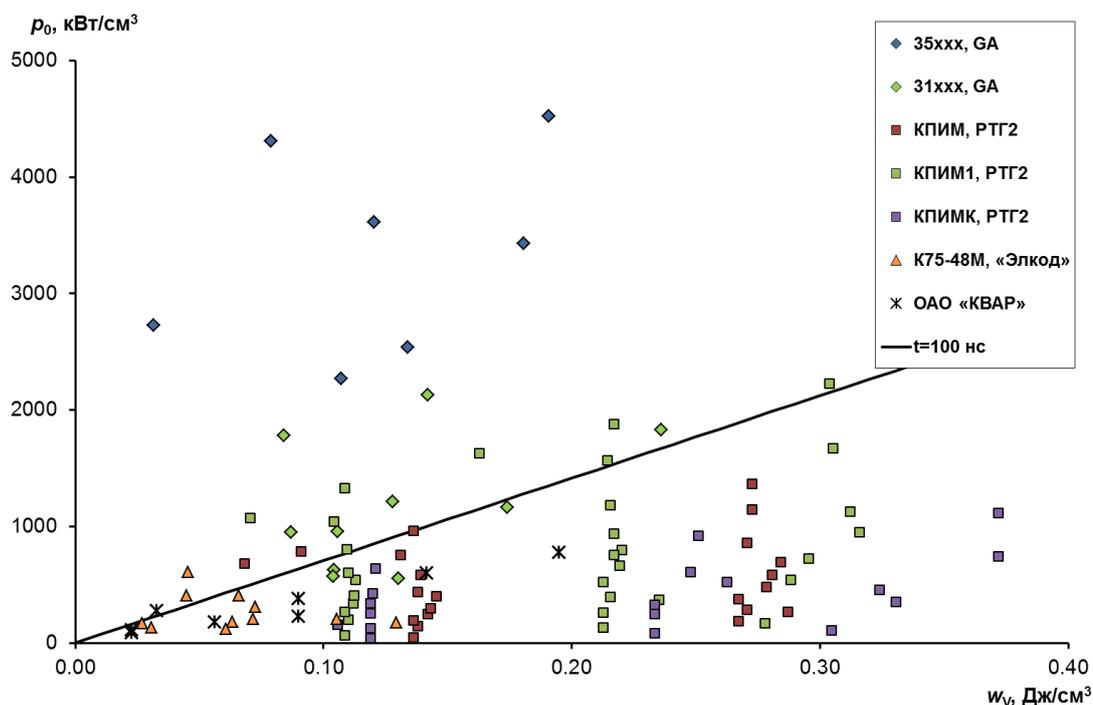


Рис. 1.5. Удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов различных производителей без учета влияния индуктивности коммутатора

Как видно из рисунка, большинство рассматриваемых конденсаторов не способны обеспечить необходимое время нарастания максимальной мощности на согласованной нагрузке, даже без учета индуктивности коммутатора и нагрузки. Другая часть конденсаторов, способных обеспечить необходимое время нарастания, имеет небольшую плотность энергии – менее  $0,05 \text{ Дж/см}^3$ , сравнимую с пленочными конденсаторами. Эти конденсаторы не будут рассматриваться при дальнейшем анализе (рис. 1.6).

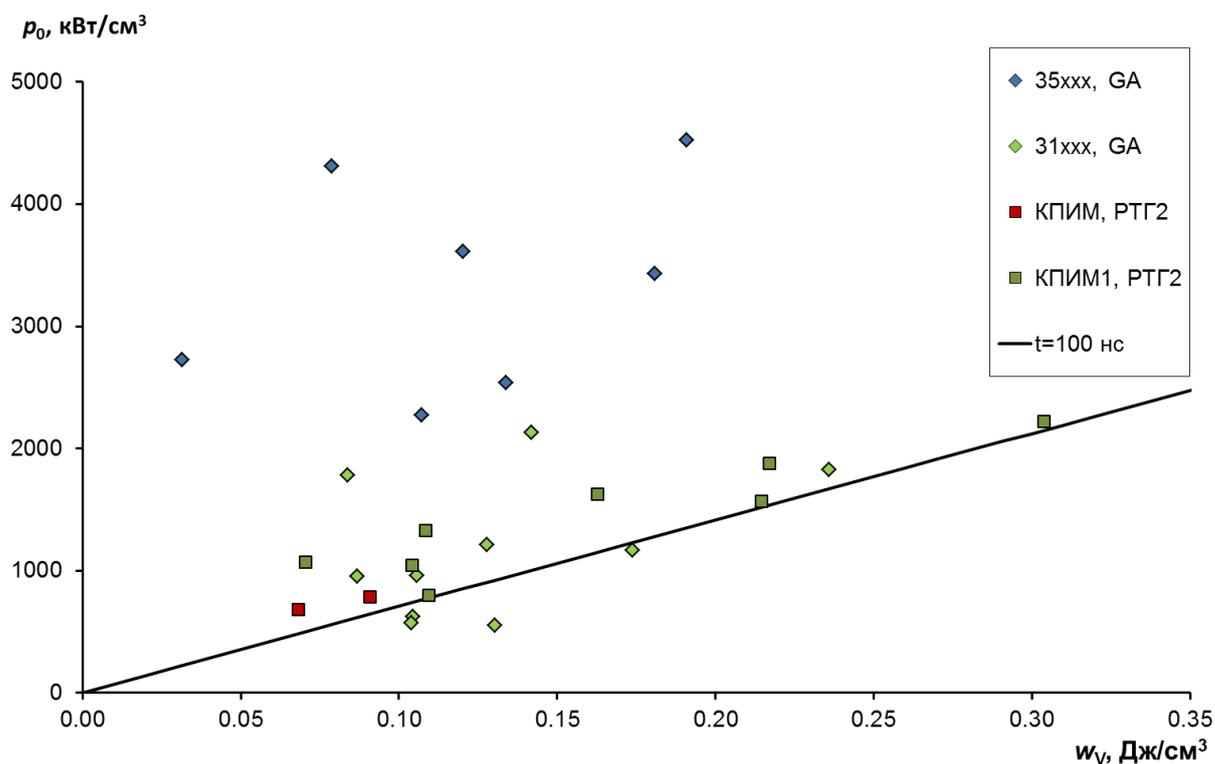


Рис. 1.6. Удельные характеристики конденсаторов без учета влияния индуктивности коммутатора

Для дальнейшего уточненного анализа рассмотрим другой элемент разрядного контура конденсатора – коммутатор, и оценим его вклад в суммарную индуктивность разрядного контура. Для этого сформулируем требования, предъявляемые к коммутатору, предназначенному для применения в «быстрых» к.к.с., согласно которым выберем тип наиболее подходящего. Затем произведем оценку интересующего нас параметра – индуктивности коммутатора.

Коммутатор, предназначенный для применения в быстрых к.к.с., должен сочетать в себе следующие характеристики [37]:

- малое время коммутации  $t_k \sim 10^{-9} - 10^{-8}$  с;
- малое время задержки  $t_3 \sim 10^{-8} - 10^{-7}$  с и разброс срабатывания  $\Delta t_3 \sim 10^{-9}$  с;
- амплитуда коммутируемого тока не менее амплитуды разрядного тока сборки  $10^4 - 10^5$  А;

- рабочее напряжение должно быть не меньше суммарного зарядного напряжения конденсаторов секции, то есть  $\sim 10^5$  В;
- рабочая частота порядка 0,1 Гц;
- коммутатор должен иметь по возможности минимальные значения остаточного сопротивления и индуктивности, которые влияют на эффективность передачи энергии от конденсатора в нагрузку;
- коммутатор должен быть прост в эксплуатации, иметь небольшие габариты и при этом длительный ресурс (порядка  $10^5$ ) и высокую надежность, то есть низкую вероятность ошибочного срабатывания на уровне  $10^{-6}$ .

Согласно классификации, представленной в [2], всем вышеперечисленным параметрам в наибольшей степени удовлетворяют разрядники с высоким давлением газа. При этом наиболее перспективной рабочей средой представляется сухой воздух, так как он не токсичен, по сравнению с «элегазом», и не требует дополнительных резервуаров для хранения, в отличие от других газов или смесей. К тому же при давлении в несколько атмосфер он не уступает другим газам и способен обеспечить время коммутации менее 10 нс (рис. 1.7) [2].

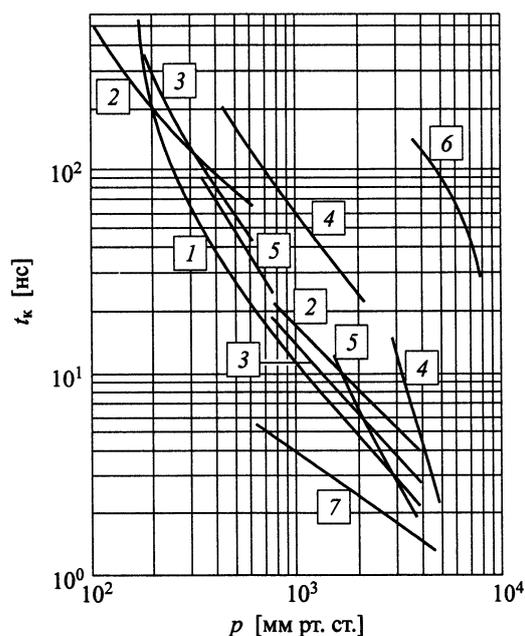


Рис. 1.7. Зависимость длительности фронта импульса от давления газа в промежутке: 1 – воздух, 2 – углекислый газ, 3 – азот, 4 – водород, 5 – фреон, 6 – гелий, 7 – аргон

Требуемым временным характеристикам (субнаносекундным временам задержки и наносекундному разбросу срабатывания) отвечают трехэлектродные и многоэлектродные коммутаторы [2]. Малое и стабильное время срабатывания имеют трехэлектродные разрядники, управляемые по принципу искажения поля. Рабочее напряжение таких разрядников для различных вариантов конструкции варьируется от десятков кВ [1,38] до единиц мегавольт [47], при этом разброс срабатывания составляет 1–2 нс. Амплитуда коммутируемого тока таких разрядников может достигать десятков килоампер.

Многоэлектродные разрядники имеют временные характеристики, схожие с трехэлектродными, однако амплитуда коммутируемого тока у них имеет более широкий диапазон – от 25–100 кА [29] до нескольких мегаампер [48]. Одним из основных недостатков многоэлектродного разрядника является необходимость распределения квазистатического зарядного напряжения на стадии заряда по межэлектродным промежуткам. Распределение напряжения обычно реализуют с помощью резистивного делителя, который должен

выдерживать полное рабочее напряжение и иметь сопротивление на уровне  $10^9 \div 10^{10}$  Ом, обеспечивать срок службы не менее срока службы разрядника и конструктивно вписываться в его габариты [2].

Зачастую такой делитель невозможно изготовить на основе резисторов, выпускаемых промышленностью. В таких случаях в разрядниках применяют в качестве делителя коронный разряд [29]. Для распределения напряжения между зазорами с помощью тока коронного разряда на промежуточных электродах разрядника устанавливаются иглы таким образом, чтобы коронирующие острия являлись катодами. Однако применение такого способа распределения напряжения усложняет конструкцию и требует решения дополнительной нетривиальной задачи – подбора длины иглы. При слишком короткой длине иглы порог зажигания коронного разряда слишком высок, а уровень тока коронного разряда слишком мал, что приводит к неэффективному распределению напряжения и повышает вероятность самопробоя. При слишком длинной игле ток коронного разряда становится слишком велик, что приводит к снижению напряжения самопробоя разрядника и уменьшает его надежность. К тому же применение иголок требует их приработки, что приводит к дополнительным трудностям при эксплуатации разрядников с распределением потенциала между электродами с помощью коронного разряда.

Интересующая нас характеристика – индуктивность коммутатора – обычно зависит от геометрии токопроводящего контура, который, в свою очередь, зависит от рабочего напряжения, от конструкции электродов разрядника, количества и длины зажигаемых искровых каналов и от конфигурации токоведущих шин, соединяющих коммутатор с конденсатором. Наименьшие значения индуктивности обычно имеют разрядники, в которых реализуется многоканальный характер разряда. Например, разрядник MMSC с рабочим напряжением 90 кВ и с коаксиальным металлическим корпусом, выполняющим функцию обратного токопровода, имеет индуктивность всего  $8,5 \pm 0,5$  нГн [2]. Аналогичный разрядник MMSS [49], разработанный для

ступеней линейного трансформатора и выполненный уже без металлического корпуса, имеет вместе с подводами индуктивность 14 нГн. Индуктивность разрядника «FAST LTD» [50] с рабочим напряжением  $\pm 95$  кВ изменялась в зависимости от амплитуды разрядного тока в пределах 60–120 нГн. При этом токосъем осуществлялся аксиально-несимметрично, а функции обратного токопровода выполняли шины, соединяющие разрядник с потенциальными выводами конденсаторов.

В работах [51, 52] представлены результаты испытаний нескольких трехэлектродных газовых разрядников высокого давления, разработанных в коллаборации Sandia National Laboratories и нескольких коммерческих компаний США и предназначенных для применения в LTD-ступенях. Разрядники «Kinetech 2» и «L3» [52] имеют меньшие габаритные размеры и индуктивность по сравнению с базовым разрядником «FAST LTD» [50], применяемым в различных LTD-ступенях [29–32].

Основные параметры всех трех разрядников, полученные в результате испытаний [52] представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Основные параметры малоиндуктивных газовых разрядников, разработанных для применения в LTD-генераторах [52]

Разрядник	FAST LTD	Kinetech 2	L3
Количество и длина зазоров	6 по 6 мм	2 по 5 мм	2 по 6,4 мм
Рабочее напряжение, кВ	200 кВ	200 кВ	200 кВ
Рабочее давление, атм.	2,7–4,2	15,6–18,4	6,8–10,2
Внешний диаметр разрядника, мм	140	73	117
Высота разрядника, мм	159	117	76
Индуктивность разрядника, нГн	115	69	85
Индуктивность сборки, нГн	185	139	155

В работе [38] описана к.к.с., в которой используется газовый разрядник тригatronного типа, управляемый по принципу искажения поля, на рабочее

напряжение 50 кВ. Разрядник расположен по центру внутри полого цилиндрического конденсатора, а его индуктивность составляет порядка 16 нГн.

Как видно, индуктивность разрядников, применявшихся для построения к.к.с., изменяется в широких пределах, в зависимости от максимального рабочего напряжения разрядника, его конструкции и расположения относительно конденсатора и других токоведущих частей к.к.с. Однако собственная индуктивность разрядника, приведенная к его максимальному рабочему напряжению, практически для всех рассмотренных разрядников превышает значение  $l_{sw} = 0,3$  нГн/кВ. Используем это значение для учета индуктивности разрядника при уточнённом расчете максимальной удельной мощности конденсатора на согласованной нагрузке:

$$P_{max} = \frac{0,3U_0^2}{V\sqrt{L_{PK}/C_0}} = \frac{0,3U_0^2}{V\sqrt{(L_0 + L_{SW})/C_0}} = \frac{0,3U_0^2}{V\sqrt{(L_0 + U_0l_{sw})/C_0}} \quad (1.6)$$

Тогда представленный ранее график (рис. 1.6) примет вид, представленный на рис. 1.8.

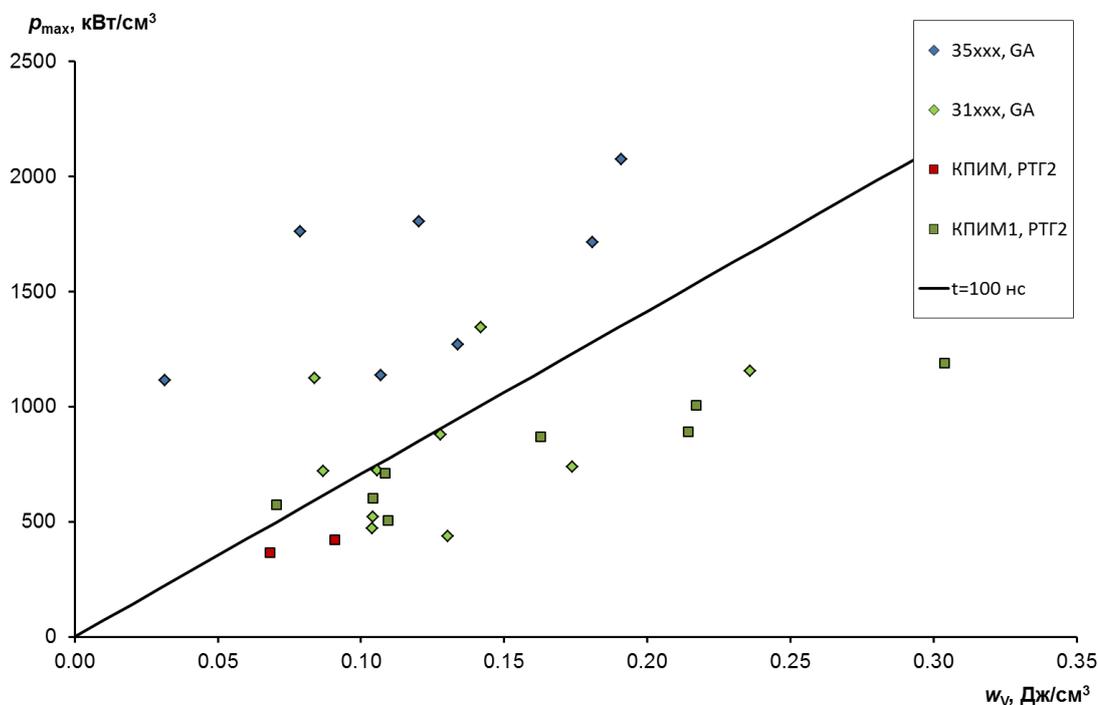


Рис. 1.8. Удельные характеристики конденсаторов с учетом влияния индуктивности коммутатора

После уточненного расчета, учитывающего влияние индуктивности разрядника, часть конденсаторов оказалась ниже прямой, соответствующей необходимому времени нарастания максимальной мощности в согласованной нагрузке. Значит эти конденсаторы также не могут применяться для построения быстрых конденсаторно-коммутаторных сборок в случае использования существующих газовых разрядников. Для применения таких конденсаторов, с целью получения импульса мощности в согласованной нагрузке с временем нарастания порядка 100 нс, потребуется разработка новых разрядников, приведенная индуктивность которых  $l_{sw}$  должна быть менее 0,3 нГн/кВ, что может оказаться трудно реализуемо на практике. Среди рассмотренных конденсаторов только конденсаторы производства ГА имеют удельный запас энергии выше 0,10 Дж/см<sup>3</sup>, и способны при этом обеспечить на согласованной нагрузке импульс мощности с временем нарастания 100 нс или меньше при коммутации с помощью существующих малоиндуктивных газовых разрядников. Это предопределило их применение при построении «быстрых» LTD-ступеней различного уровня выходной мощности, способных обеспечить на согласованной нагрузке импульс мощности с временем нарастания около 100 нс или менее [29–33].

Значение удельной мощности, найденное с помощью выражения (1.6), для большинства конденсаторов ГА является завышенным, что связано с их ограничением по максимально допустимой величине разрядного тока  $I_M$ . Для таких конденсаторов значение удельной максимальной мощности определяется выражением

$$P_{\max} \approx \frac{U_0 I_M}{V}. \quad (1.7)$$

Значения удельных параметров конденсаторов ГА найденные с учетом выражения (1.7), представлены на рис. 1.9.

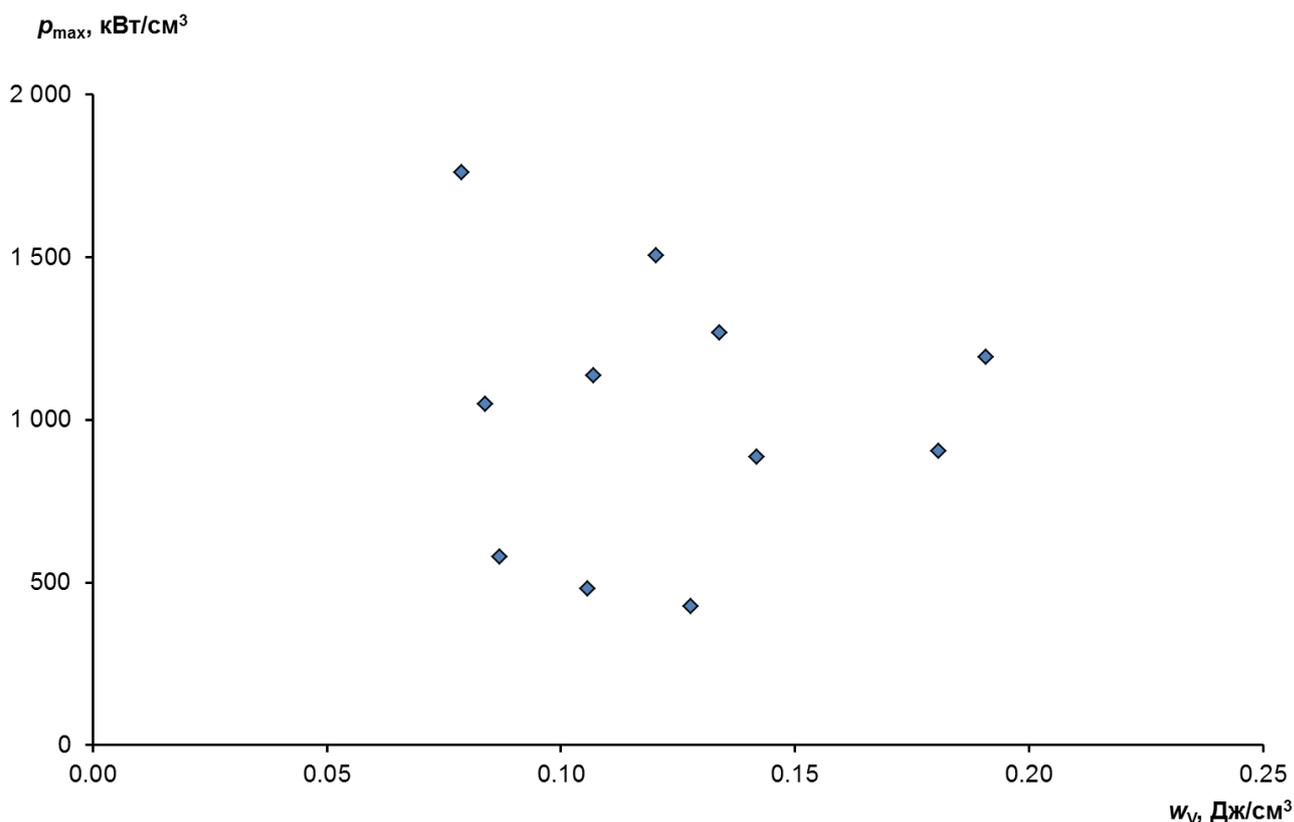


Рис. 1.9. Удельные параметры «быстрых» конденсаторов GA, найденные с учетом выражения (1.7)

Как видно из последнего графика (рис. 1.9), «быстрые» конденсаторы GA, которые имеют наибольшую удельную мощность (1500–1800 кВт/см<sup>3</sup>), обладают сравнительно небольшим удельным энергозапасом (0,08–0,12 Дж/см<sup>3</sup>), а конденсаторы с наибольшей плотностью запасаемой энергии (0,18–0,19 Дж/см<sup>3</sup>) имеют сравнительно небольшую удельную мощность (900–1200 Вт/см<sup>3</sup>). Удельные параметры к.к.с. во многом определяются удельными параметрами его составных частей – конденсаторов и малоиндуктивных газовых разрядников. Поэтому для построения «быстрых» к.к.с. с удельными параметрами, превышающими существующие, необходим комплексный подход, включающий создание новых малоиндуктивных высоковольтных импульсных конденсаторов с большими удельными параметрами и коммутаторов с меньшей индуктивностью, а также поиск новых конструктивных решений, позволяющих снизить суммарную индуктивность всей к.к.с.

## Выводы

1. Среди рассмотренных конденсаторов только конденсаторы производства GA серии 35xxx и 31xxx имеют удельный запас энергии выше  $0,10 \text{ Дж/см}^3$ , и способны при этом обеспечить на согласованной нагрузке импульс мощности с временем нарастания 100 нс или меньше при коммутации с помощью существующих малоиндуктивных газовых разрядников. Конденсаторно-коммутаторные сборки, построенные с использованием таких конденсаторов, ограничены их рабочими характеристиками (максимальной амплитудой разрядного тока), что не позволяет на их основе создать новые к.к.с. с более высокой удельной и абсолютной выходной мощностью, хотя потребность в таких к.к.с. существует.
2. Для создания быстрых к.к.с. с более высокими выходными характеристиками необходимы новые малоиндуктивные высоковольтные импульсные конденсаторы, чьи удельные характеристики будут выше, чем у существующих. Не только параметры, но и конструкция таких конденсаторов должна обеспечивать наименьшую суммарную индуктивность при конструктивном объединении с существующими или вновь разработанными газовыми разрядниками. Новые к.к.с. должны иметь более высокую, по сравнению с существующими аналогами, удельную или абсолютную выходную мощность, чтобы обеспечить импульс электрической мощности амплитудой более 5 ГВт с временем нарастания 100 нс в согласованной нагрузке.
3. С практической точки зрения, для проектирования различных генераторов, построенных на основе к.к.с., представляет интерес оценка эффективности передачи энергии из емкостного накопителя в нагрузку при наносекундных временах коммутации и амплитуде коммутируемого тока порядка 100 кА. Для решения этой задачи необходимо провести

численное и экспериментальное исследования потерь энергии в искровых газовых разрядниках при обозначенных условиях.

4. Для практических применений представляет интерес разработка компактных драйверов как для низкоимпедансных нагрузок (плазменные лайнеры, X-пинчи и т. д.), так и для высокоомных нагрузок (электронные и ионные пучки, род-пинч-диоды и т. д.) различного уровня выходного напряжения, построенные на основе малоиндуктивных к.к.с.

## Глава 2. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ИСКРОВЫХ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДНИКАХ

Для коммутации сильноточных импульсов в большом диапазоне времен (от субнаносекундных до микросекундных) широко используются искровые газовые разрядники [2, 53–55]. Они находят применение при проведении различных электрофизических экспериментов: для получения электронных и ионных пучков [56–59]; возбуждения мощных электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона [60,61]; создания высокоинтенсивных источников рентгеновского излучения [58, 62–67]; при исследовании свойств газовых разрядов [68–70] и т. д.

Искровые газовые разрядники оказались востребованными и при создании «быстрых» конденсаторно-коммутаторных сборок в составе установок, способных передать в нагрузку энергию мегаджоульного уровня за время около 100 нс [37], востребованность которых обусловлена работами по реализации инерциального термоядерного синтеза. В частности, сильноточные импульсные генераторы служат драйверами в схемах, в которых для зажигания термоядерной мишени используются Z-пинчи [17, 71–73]. Техника формирования мощных наносекундных импульсов предусматривает применение многомодульной системы, где из каждого модуля через коммутатор энергия поступает либо на промежуточный накопитель [74, 75], либо на передающую линию [31, 32, 37]. Одним из важных вопросов при проектировании подобного рода установок является вопрос об эффективности использования энергии первичного накопителя [76], составной частью которого является минимизация потерь в коммутаторах. Данная глава посвящена анализу потерь энергии в искровых газовых разрядниках, а также экспериментальной проверке полученных зависимостей.

## 2.1. Различные модели искрового газового разряда

Теоретическое описание работы коммутаторов тока основывается на теории газового разряда. В настоящее время нет полностью законченных и непротиворечивых теорий разряда, несмотря на большое число работ и монографий, посвященных данному вопросу [68, 77–79]. Однако основные выводы, вытекающие из анализа достаточно простых механизмов формирования разряда, все же имеют практическую ценность и используются при разработке коммутаторов тока [53].

При работе разрядника в газе образуется токовый канал, сопротивление которого равно:

$$R_s = \frac{l_s}{\pi a^2 \sigma}, \quad (2.1)$$

где  $l_s$  – длина канала;  $\sigma$  – проводимость канала;  $a$  – радиус канала. Для определения зависимости радиуса канала и проводимости от времени используются различные модельные представления.

Так, в модели Теплера [80] сопротивление канала определяется следующим выражением:

$$R_s(t) = k_T \frac{l_s}{\int_0^t I dt'}, \quad (2.2)$$

где  $I$  – ток разряда;  $k_T = (\alpha\mu)^{-1}$ ;  $\alpha$  – коэффициент ударной ионизации газа;  $\mu$  – подвижность электронов в газе. Однако использование аналитических значений коэффициента  $k_T$  не позволяет добиться хорошего согласия с экспериментом, в то время как эмпирические значения позволяют удовлетворительно описать спад напряжения на разряднике [53].

В модели Вайцеля–Ромпе [81] сопротивление канала определяется соотношением:

$$R_s(t) = k_{WR} \frac{l_s}{\sqrt{\int_0^t I^2 dt'}}. \quad (2.3)$$

Согласно этой теории вся энергия, выделившаяся в искре, идет на рост внутренней энергии газа. Коэффициент  $k_{WR}$  в (2.3) также может быть определен аналитически, однако, как и в модели Теплера в этом случае не удается достичь хорошего согласия с экспериментом. Поэтому коэффициент  $k_{WR}$  также определяется эмпирически, при этом удается добиться хорошего согласия с экспериментом в диапазоне времен коммутации  $10^{-7}$  с [82].

Для наносекундных коммутаторов наилучшее согласие с экспериментом дает модель, предложенная С.И. Брагинским [83], которая описывает развитие искрового канала в газе при больших давлениях и умеренных токах. В ней предполагается, что в газе образуется сравнительно узкий токопроводящий канал, в котором выделяется джоулево тепло, что приводит к повышению давления газа и к образованию в газе ударной волны. В модели Брагинского выделяется три области: невозмущенный газ; зона ударной волны, за фронтом которой температура существенно выше, чем в невозмущенном газе; токовый канал, в котором плотность газа мала, а температура существенно выше, чем в ударной волне. Предполагается, что отвод тепла из канала осуществляется излучением, которое поглощается в зоне ударной волны. В этой области (в зоне ударной волны) происходит и ионизация газа. Для этого случая построено автомодельное решение, в котором давление, температура и плотность постоянны вдоль радиуса канала, а скорость расширения канала пропорциональна радиусу. Уравнение баланса энергии в этом решении имеет вид

$$\frac{I^2}{\sigma} = \frac{\pi^2 \xi}{4} \rho \left( \frac{da^2}{dt} \right)^3, \quad (2.4)$$

где  $\rho$  – плотность газа перед ударной волной;  $\xi$  – безразмерная величина, в общем случае являющаяся функцией времени.

В [83] показано, что в диапазоне значений тока  $I$ , в котором применима модель, при расширении канала температура в нем меняется медленно, поэтому ее можно считать приблизительно постоянной. При этом постоянными

оказываются проводимость канала и безразмерная функция  $\xi$ . Согласно [83], значения этих функций для разряда в воздухе следующие:  $\sigma = 2 \cdot 10^{14} \text{ сек}^{-1}$ ;  $\xi = 4,5$ .

Нижний предел модели Брагинского (по току) определяется тем, что для значительной ионизации температура в канале должна быть достаточно высокой (не ниже 1 эВ), поэтому ток не должен быть слишком мал и должен нарастать за достаточно короткое время [83], то есть

$$I \gg 10^{-2} t^{3/4}. \quad (2.5)$$

В (2.5) ток в килоамперах, время в микросекундах. Под  $t$  в (2.5) подразумевается характерное время формирования канала.

Верхний предел модели Брагинского определяется требованием малости магнитного давления (которое не учитывается в модели) по сравнению с тепловым. Поэтому должно выполняться условие [83]:

$$I < 250 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}. \quad (2.6)$$

В (2.6) ток также в килоамперах, а  $\rho_0$  – плотность газа при нормальных условиях (для воздуха  $\rho_0 = 1.29 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ ).

Выражение для сопротивления канала в модели Брагинского можно получить из (2.1), с учетом (2.4) оно имеет вид

$$R_s(t) = \left( \frac{\xi \rho}{4\pi\sigma^2} \right)^{1/3} \frac{l_s}{\int_0^t I^{2/3} dt'}. \quad (2.7)$$

В дифференциальной форме выражение (2.7) принимает вид

$$\frac{1}{R_s^2} \frac{dR_s}{dt} = -\frac{1}{l_s} \left( \frac{4\pi\sigma^2}{\xi\rho} \right)^{1/3} I^{2/3}. \quad (2.7a)$$

Начальное условие для уравнения (2.7a):  $R_s(t=0) \rightarrow \infty$ .

При записи  $R_s$  в виде (2.7) не учитывается изменение индуктивности искрового канала  $L_s$ . Это справедливо в случае, когда  $R_s(t) \gg \frac{dL_s}{dt} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{2l_s}{a} \frac{da}{dt}$ , где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость в вакууме, что всегда выполняется в фазе

коммутации, когда  $R_s$  велико. При росте  $R_s$  радиус канала  $a$  увеличивается, а скорость расширения уменьшается [83, 84], то есть  $L_s$  стремится к какой-то постоянной величине, которую обычно определяют экспериментально из осциллограмм тока и напряжения. Отметим, что коммутатор обладает емкостью, которая, однако, пренебрежимо мала.

Модель Брагинского используется для описания искры не только в газах, но и в жидкостях. Например, в работе [84] для искры в различных средах проводится сравнение экспериментальных и расчетных результатов, показывающее хорошее согласие между ними. Там же для этих сред, в которых проводились эксперименты с искрой, приводят значения проводимостей канала, при которых достигается наилучшее согласие теории и эксперимента. Согласно [84], для воздуха проводимость канала  $\sigma = 200 \text{ } \Omega \cdot \text{см} = 1,8 \cdot 10^{14} \text{ сек}^{-1}$ , то есть в этом случае экспериментально определенное значение проводимости хорошо согласуется с теоретическим значением, вычисленным Брагинским [83].

В работе [33] получено аналитическое решение уравнения (2.7) при линейно нарастающем токе и определена энергия, выделяющаяся в разряде:

$$E_s \approx \frac{5}{4} \left( \frac{\xi \rho}{4\pi\sigma^2} \right)^{1/3} l_s I_m^{4/3}, \quad (2.8)$$

где под  $I_m$  подразумевается максимальный ток в канале.

Важной характеристикой искры, используемой при разработке коммутаторов, является длительность фазы коммутации разряда  $t_r$ . Это время, которое может быть использовано как для оценки применимости модели Брагинского в (2.5), так и для оценки энергии, выделяемой в разряде. В работе [85] энергия, выделяемая в разряде, определяется через  $t_r$  следующим образом:

$$E_s \approx \frac{1}{4} U_m I_m t_r, \quad (2.9)$$

где  $U_m$  – максимальное напряжение, приложенное к каналу. В работе [85] для времени коммутации предлагается использовать следующее эмпирическое выражение:

$$t_r \approx 88Z^{1/3} E_m^{4/3} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}, \quad (2.10)$$

где  $Z$  – импеданс генератора в Омах;  $E_m$  – максимальное значение напряженности электрического поля в зазоре коммутатора, в десятках кВ/см;  $t_r$  в нс. Однако использование выражений (2.9) и (2.10) не всегда позволяет добиться хорошего согласия между экспериментальными и теоретическими результатами [84]. Так, например, в работе [84] отмечено расхождение экспериментально определенных значений  $E_s$  со значениями, определенными с помощью выражений (2.9) и (2.10), от 2 до 10 раз. Отметим, что кроме (2.10) существуют и другие выражения, определяющие величину времени коммутации [53]. Однако следует подчеркнуть, что не существует однозначного определения времени коммутации. Например, время коммутации (2.10) интерпретируется как постоянная экспоненциального спада напряжения на разряднике, а в теории в модели Вайцеля–Ромпе время коммутации определяется как время спада напряжения между уровнями 0,9–0,2  $U_m$  [81].

Проведем численные исследования уравнения (2.7а), основанного на модели Брагинского, совместно с уравнениями электрического контура генератора при работе на различные типы нагрузок. На основе численных решений построим выражения, определяющие энергию, выделившуюся в коммутаторе.

## 2.2. Безразмерные уравнения электрического контура

Будем считать, что генератор представляет собой  $RLC$ -контур, состоящий из  $N$  параллельно соединенных сборок, так, как это показано на рис. 2.1.

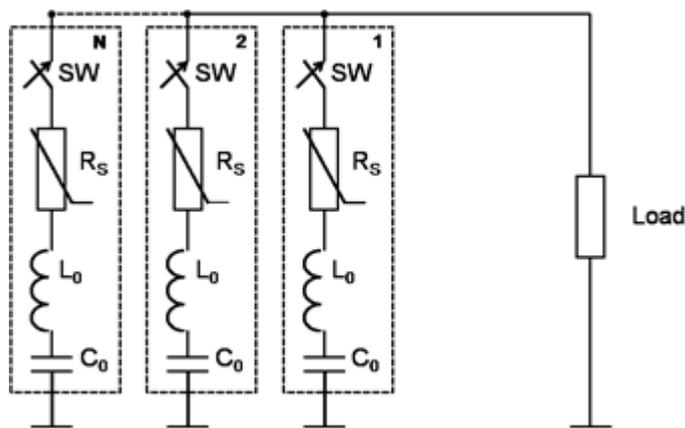


Рис. 2.1. Схема RLC-контура

Рассмотрим модель, которая включает в себя уравнения RLC-контура и уравнение (2.7а), описывающее сопротивление разрядника. Уравнения RLC-контура для каждой из сборок имеет следующий вид:

$$L_0 \frac{dI}{dt} = U - U_L - IR_s; \quad \frac{dU}{dt} = -\frac{I}{C_0}, \quad (2.11)$$

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.

К начальным условиям уравнения (2.7а) добавятся еще два начальных условия:  $I(t=0) = 0$ ,  $U(t=0) = U_0$ , где  $U_0$  – напряжение, до которого заряжается конденсаторная батарея.

Перепишем систему уравнений (2.7а, 2.11) в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{di}{d\tau} &= \frac{\pi}{2}(u - u_L - ir_s); \\ \frac{du}{d\tau} &= -\frac{\pi}{2}i; \\ \frac{dr_s}{d\tau} &= -Ar_s^2 i^{2/3}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $\tau = \frac{t}{t_0}$  – безразмерное время;  $i = \frac{I}{I_0}$  – безразмерный ток;  $u = \frac{U}{U_0}$  –

безразмерное напряжение;  $u_L = \frac{U_L}{U_0}$  – безразмерное напряжение на нагрузке;

$r_s = R_s / Z_0$  – безразмерное сопротивление разрядника;  $Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$  – волновое

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

$E_0 = \frac{C_0 U_0^2}{2}$  – энергия, запасенная в конденсаторной батарее одной сборки.

Масштабы времени и тока определяются выражениями:

$$t_0 = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_0 C_0}; \quad I_0 = \frac{U_0}{Z_0}. \quad (2.13)$$

Начальные условия при решении системы уравнений (2.12):  $i(\tau=0)=0$ ;  $u(\tau=0)=1$ ;  $r_s(\tau=0)=100$ . Последнее начальное условие означает, что в начале коммутации сопротивление разрядника считалось равным 100 волновым сопротивлениям сборки  $Z_0$ . Отметим, что уже при  $r_s(\tau=0) > 10$  отсутствовало заметное влияние этого начального условия на процессы, протекающие в колебательном контуре.

### 2.3. Режим короткого замыкания

Рассмотрим вначале режим короткого замыкания. В этом случае напряжение на нагрузке равно нулю, то есть  $U_L \equiv u_L \equiv 0$  и система уравнений (2.12) содержит только один параметр  $A$ . Результаты численного решения системы уравнений (2.12) при различных значениях параметра  $A$  представлены на рис. 2.2–2.5. На рис. Рис. 2.2 показаны зависимости от времени безразмерного тока  $i$ , а на рис. 2.3 – величины  $u_s = ir_s$ , то есть безразмерного напряжения на разряднике. Величины  $u_s$  на рис. Рис. 2.3 имеют максимум вблизи начала коммутации, который, однако, не имеет физического смысла.

Этот максимум появляется как следствие несовершенства используемой модели, в которой не учитывается емкость разрядника. При учете этой емкости напряжение на разряднике в начале коммутации было бы равно напряжению на конденсаторе, то есть  $U_s(t=0)=U_0$ , а  $u_s(\tau=0)=1$ . Однако, как уже отмечалось выше, емкость разрядника мизерная и никак не влияет на дальнейший процесс коммутации.

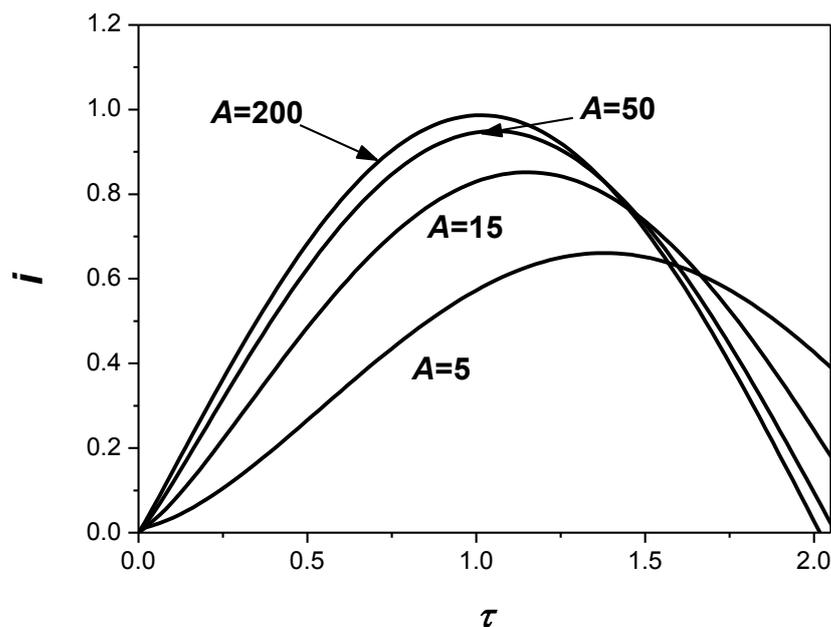


Рис. 2.2. Зависимость безразмерного тока от безразмерного времени

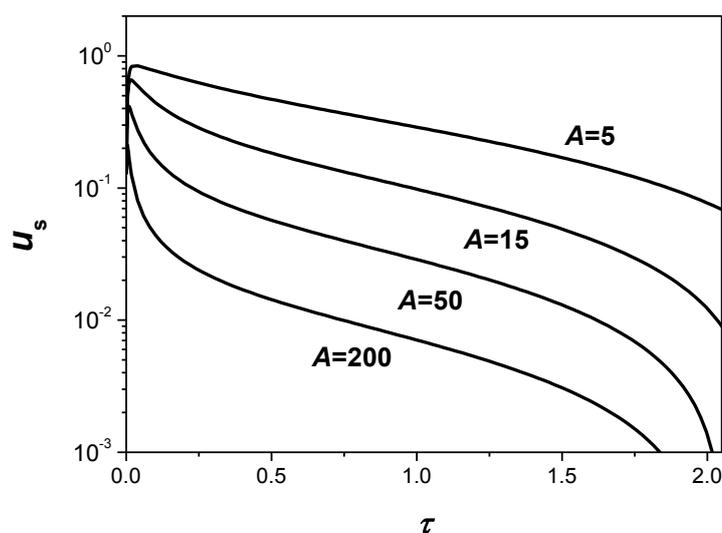


Рис. 2.3. Зависимости безразмерного напряжения на разряднике от безразмерного времени

На рис. 2.4 приведены зависимости от времени отношения энергии, выделившейся в разряднике, к энергии, запасенной в конденсаторной батарее одной сборки, при различных значениях параметра  $A$ :

$$\delta(\tau) = \frac{E_s}{E_0} = \frac{\int_0^t I^2 R_s(t') dt'}{\frac{C_0 U_0^2}{2}} = \pi \int_0^\tau i^2 r_s(\tau') d\tau'. \quad (2.14)$$

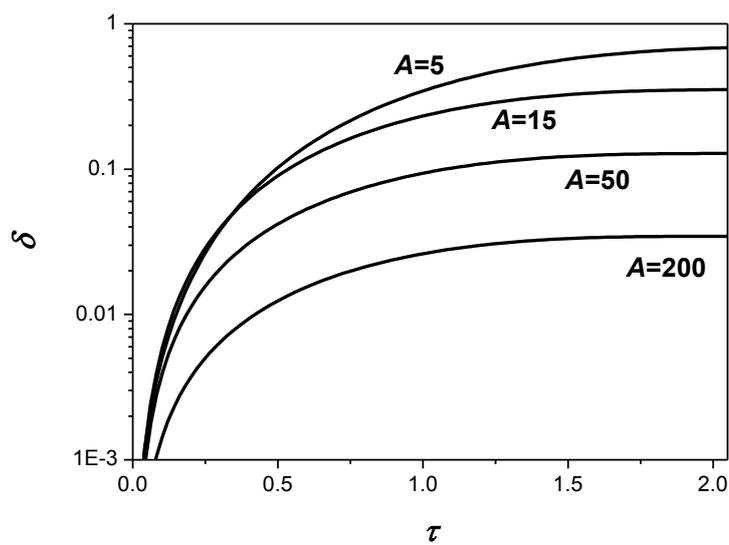


Рис. 2.4. Зависимость безразмерных потерь энергии в разряднике от безразмерного времени

Как видно из рис. 2.4 величина  $\delta(\tau)$ , то есть потери энергии в разряднике, быстро растет вначале первого полупериода импульса тока, к концу которого при всех значениях параметра  $A$  рост  $\delta(\tau)$  сильно замедляется. Значение величины  $\delta(\tau)$  в конце первого полупериода уменьшается с увеличением параметра  $A$ . Причем уменьшение значения величины  $\delta(\tau)$  приблизительно пропорционально  $(u_s^r)^2$ , где  $u_s^r$  — значение безразмерного напряжения на разряднике в момент времени, когда  $r_s(\tau_r)=1$ . То есть относительная доля потерь энергии в разрядниках тем меньше, чем меньше относительное падение напряжения (по отношению к зарядному напряжению) на разряднике в течение процесса коммутации.

Далее рассмотрим работу генератора на различные типы нагрузок.

#### 2.4. Активная нагрузка

Рассмотрим работу генератора на активную нагрузку – сопротивление  $R_L$ . В этом случае напряжение на нагрузке  $U_L = NIR_L$ , где  $N$  – число сборок, включенных параллельно, в генераторе тока. Тогда система уравнений (2.12) примет вид:

$$\begin{aligned}\frac{di}{d\tau} &= \frac{\pi}{2}(u - ir_s - iB); \\ \frac{du}{d\tau} &= -\frac{\pi}{2}i; \\ \frac{dr_s}{d\tau} &= -Ar_s^2 i^{2/3},\end{aligned}\tag{2.15}$$

где  $B = \frac{NR_L}{Z_0}$  – безразмерный параметр, численно равный отношению сопротивления нагрузки к волновому сопротивлению одной сборки и умноженному на число сборок генератора. То есть в этом случае система уравнений (2.15) становится двухпараметрической. Рассмотрим решение системы уравнений (2.15) при различных значениях параметров  $A$  и  $B$ .

На рис. 2.5 показана зависимость величины  $\Delta = \delta(\tau_h)$  от параметра  $A$  при различных значениях параметра  $B$ . При определении величины  $\Delta$  в качестве верхнего предела интегрирования в (2.14) выбиралось время окончания первого полупериода  $\tau_h$ , когда ток в контуре становился равным нулю. Как видно из рис. 2.5, расчетные кривые  $\Delta$  (сплошные линии на рис. 2.5) с достаточной хорошей точностью аппроксимируются выражением

$$\Delta \approx \frac{7}{A(1+B)}.\tag{2.16}$$

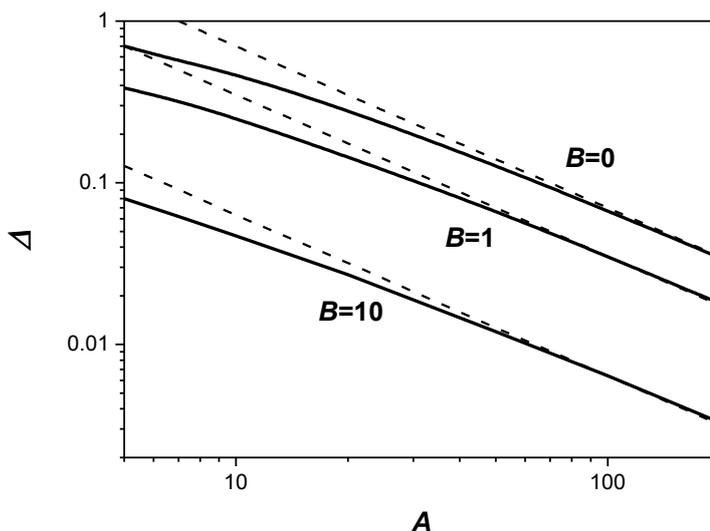


Рис. 2.5. Активная нагрузка. Зависимость безразмерных потерь энергии в разряднике (за первый полупериод) от параметра  $A$

Кривые, соответствующие аппроксимации (2.16), на рис. Рис. 2.5 показаны пунктирными линиями. Режиму короткого замыкания соответствует кривая  $B=0$ . Как видно из этого рисунка, аппроксимация (2.16) асимптотически верно описывает поведение  $\delta_h$  при  $A \rightarrow \infty$ .

Подставляя в (2.16) значение параметра  $A$  получим следующее выражение:

$$\Delta \approx \frac{E_s}{E_0} \approx \left( \frac{\xi \rho}{8\pi\sigma^2 L_0^2 E_0} \right)^{1/3} \frac{7I_s}{(1+B)}. \quad (2.16a)$$

То есть относительные потери растут с ростом длины зазора и плотности газа в разряднике и падают с ростом индуктивности сборки и энергии, запасаемой в конденсаторе. Относительные потери также уменьшаются с увеличением сопротивления нагрузки и числа сборок.

### 2.5. Емкостная нагрузка

Рассмотрим работу генератора на емкостную нагрузку – емкость  $C_L$ . В этом случае напряжение на нагрузке находится из следующего

дифференциального уравнения:  $\frac{dU_L}{dt} = \frac{NI}{C_L}$ , где  $N$  – число сборок в генераторе

тока. Тогда система уравнений (2.12) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{di}{d\tau} &= \frac{\pi}{2}(u - u_L - ir_s); \\ \frac{du}{d\tau} &= -\frac{\pi}{2}i; \\ \frac{du_L}{d\tau} &= \frac{\pi}{2}Bi; \\ \frac{dr_s}{d\tau} &= -Ar_s^2 i^{2/3}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

где  $B = \frac{NC_0}{C_L}$  – безразмерный параметр, численно равный отношению емкости одной сборки, умноженной на число сборок генератора, к емкости нагрузки. То есть и в этом случае система уравнений (2.17) является двухпараметрической. Рассмотрим решение системы уравнений (2.17) при различных значениях параметров  $A$  и  $B$ .

На рис. 2.6 показана зависимость величины  $\Delta = \delta(\tau_h)$  от параметра  $A$  при различных значениях параметра  $B$ . Как видно из рис. 2.6, расчетные кривые  $\Delta$  (сплошные линии на рис. 2.6) с достаточно хорошей точностью аппроксимируются выражением

$$\Delta \approx \frac{7}{A(1+B)^{2/3}}. \quad (2.18)$$

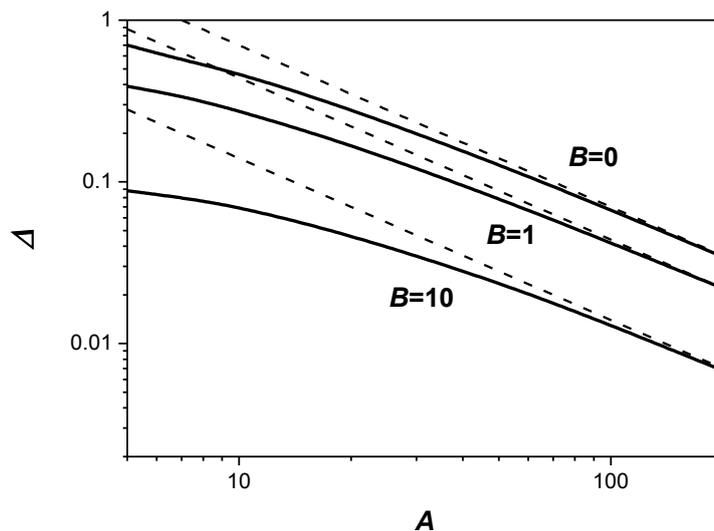


Рис. 2.6. Емкостная нагрузка. Зависимость безразмерных потерь энергии в разряднике (за первый полупериод) от параметра  $A$

Кривые, соответствующие аппроксимации (2.18), на рис. Рис. 2.6 показаны пунктирными линиями. Как видно из этого рисунка, аппроксимация (2.18) асимптотически верно описывает поведение  $\Delta$  при  $A \rightarrow \infty$ .

Подставляя в (2.18) значение параметра  $A$  получим следующее выражение:

$$\Delta \approx \left( \frac{\xi \rho}{8\pi\sigma^2 L_0^2 E_0} \right)^{1/3} \frac{7l_s}{(1+B)^{2/3}} \quad (2.18a)$$

В этом случае относительные потери, так же как и в случае активной нагрузки, уменьшаются при увеличении числа сборок, но растут при увеличении емкости нагрузки.

### 2.6. Индуктивная нагрузка

Рассмотрим работу генератора на индуктивную нагрузку – индуктивность  $L_L$ . В этом случае напряжение на нагрузке  $U_L = L_L N \frac{dI}{dt}$ , где  $N$  – число сборок, включенных параллельно на общую нагрузку. Тогда система уравнений (2.12) примет вид:

$$(1+B)\frac{di}{d\tau} = \frac{\pi}{2}(u - ir_s);$$

$$\frac{du}{d\tau} = -\frac{\pi}{2}i;$$

$$\frac{dr_s}{d\tau} = -Ar_s^2 i^{2/3},$$
(2.19)

где  $B = \frac{NL_L}{L_0}$  – безразмерный параметр, численно равный отношению индуктивности нагрузки к индуктивности одной сборки и умноженному на число сборок генератора. То есть и в этом случае система уравнений (2.19) является двух параметрической. Рассмотрим решение системы уравнений (2.19) при различных значениях параметров  $A$  и  $B$ .

На рис. 2.7 показана зависимость величины  $\Delta = \delta(\tau_h)$  от параметра  $A$  при различных значениях параметра  $B$ . Как видно из рис. 2.7 в этом случае расчетные кривые  $\Delta$  (сплошные линии на рис. 2.7) с достаточно хорошей точностью аппроксимируются выражением

$$\Delta \approx \frac{7}{A(1+B)^{2/3}}. \quad (2.20)$$

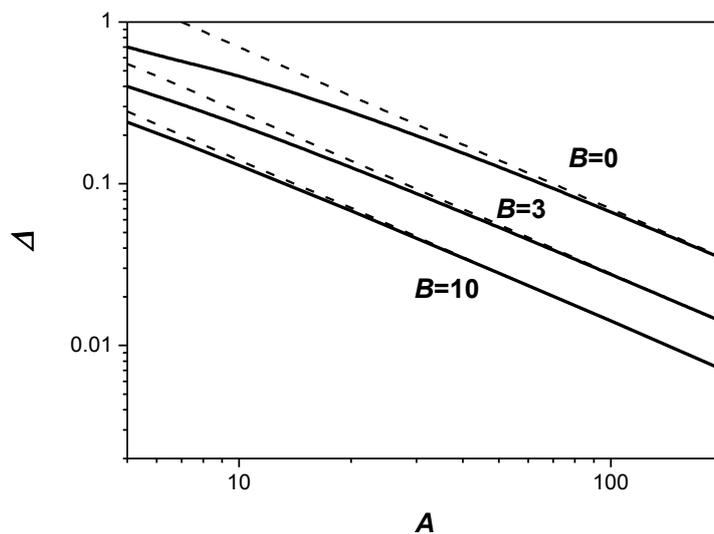


Рис. 2.7. Индуктивная нагрузка. Зависимость безразмерных потерь энергии в разряднике (за первый полупериод) от параметра  $A$

Кривые, соответствующие аппроксимации (2.20), на рис. 2.7 показаны пунктирными линиями. Режиму короткого замыкания соответствует кривая  $B = 0$ . Как видно из этого рисунка, аппроксимация (2.20) асимптотически верно описывает поведение  $\Delta$  при  $A \rightarrow \infty$ .

Подставляя в (2.20) значение параметра  $A$  для относительных потерь в разряднике в случае индуктивной нагрузки получим следующее выражение:

$$\Delta \approx \left( \frac{\xi \rho}{8\pi\sigma^2 L_0^2 E_0} \right)^{1/3} \frac{7l_s}{(1+B)^{2/3}}. \quad (2.20a)$$

То есть в этом случае, так же как и в случае активной нагрузки, относительные потери также уменьшаются с увеличением индуктивности нагрузки и числа сборок.

Перепишем выражение (2.20a) в практических единицах. Будем полагать (как и везде ниже при записи практических формул), что разрядный промежуток заполнен воздухом, плотность которого при атмосферном давлении  $\rho_0 = 1,29 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma = 1,8 \cdot 10^{14}$  сек<sup>-1</sup>,  $\xi = 4.5$  [83,84]. Тогда

$$\Delta \approx 5.8 \cdot 10^{-5} \left( \frac{p}{L_0^2 E_0} \right)^{1/3} \frac{l_s}{(1+B)^{2/3}},$$

где  $p$  – давление воздуха в атм., индуктивность в Гн, энергия в Дж, длина в см.

Величина абсолютных потерь в разряднике определяется выражением:

$$E_s = E_0 \Delta \approx 7l_s \left( \frac{\xi \rho}{8\pi\sigma^2} \right)^{1/3} \left( \frac{E_0}{L_0 + NL_L} \right)^{2/3}. \quad (2.21)$$

В практических единицах

$$E_s \approx 5.8 \cdot 10^2 p^{1/3} l_s \left( \frac{E_0}{L_0 + NL_L} \right)^{2/3},$$

где давление воздуха в атм., индуктивность в Гн, энергия в Дж, длина в см.

Основные результаты, полученные в параграфах 2.4–2.6, сведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Сводка результатов. Параллельное включение сборок

Тип нагрузки	$B$	Относительные потери в разряднике, $\Delta = \frac{E_s}{E_0}$
Активная	$B = \frac{NR_L}{Z_0}$	$2.4l_s \left( \frac{\xi\rho}{\sigma^2 L_0^2 E_0} \right)^{1/3} (1+B)^{-1}$
Емкостная	$B = \frac{NC_0}{C_L}$	$2.4l_s \left( \frac{\xi\rho}{\sigma^2 L_0^2 E_0} \right)^{1/3} (1+B)^{-2/3}$
Индуктивная	$B = \frac{NL_L}{L_0}$	$2.4l_s \left( \frac{\xi\rho}{\sigma^2 L_0^2 E_0} \right)^{1/3} (1+B)^{-2/3}$

Отметим, что для индуктивной и емкостной нагрузок потери в разряднике можно выразить в виде, подобном выражению (2.8), полученному Мартином, Сименом и Джобом в работе [84]:

$$E_s \approx 7l_s \left( \frac{\xi\rho}{32\pi\sigma^2} \right)^{1/3} I_m^{4/3}, \quad (2.22)$$

где  $I_m = \frac{U_0}{\sqrt{(1+B)\frac{L_0}{C_0}}}$  - ток, близкий к максимальному току, раскачиваемому в

контуре.

Для активной нагрузки справедливо следующее выражение:

$$E_s \approx 7l_s \left( \frac{\xi\rho}{32\pi\sigma^2} \right)^{1/3} I_0^{1/3} I_m, \quad (2.22a)$$

где в данном случае  $I_m = \frac{U_0}{(1+B)\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}}$ . То есть, так же как и в случае индуктивной

и емкостной нагрузок, это ток близкий к максимальному току, раскачиваемому в контуре.

## 2.7. Последовательное включение сборок

Рассмотрим  $RLC$ -контур, состоящий из  $N$  последовательно соединенных сборок. Такое соединение используется, например, в генераторах Аркадьева-

Маркса [см., например, 2]. В этом случае уравнения  $RLC$ -контура имеют следующий вид:

$$L_N \frac{dI}{dt} = U - U_L - NIR_s; \quad \frac{dU}{dt} = -\frac{I}{C_N}, \quad (2.23)$$

где  $C_N = \frac{C_0}{N}$ ,  $C_0$  – емкость конденсаторной батареи одной сборки,  $L_N = L_0N$ ,  $L_0$  – индуктивность одной сборки. Поделив уравнения (2.23) на  $N$ , получим систему уравнений, которая отличается от (2.11) лишь одним слагаемым в первом из уравнений, а именно: вместо слагаемого  $U_N$ , присутствующего в (2.11), появится слагаемое  $U_N/N$ . Безразмерные уравнения, соответствующие системе (2.23), будут теми же, что уже рассматривались в параграфах 2.3–2.6 этой главы, изменится лишь параметр  $B$ .

Поэтому все результаты, полученные для параллельного соединения сборок генератора в параграфах 2.3–2.6 этой главы (табл. 2.1), остаются справедливыми и для последовательного соединения сборок, если параметр  $B$  определен следующим образом:

$$\text{активная нагрузка} - B = \frac{R_L}{NZ_0};$$

$$\text{емкостная нагрузка} - B = \frac{C_0}{NC_L};$$

$$\text{индуктивная нагрузка} - B = \frac{L_L}{NL_0}.$$

То есть если в случае параллельного соединения рост числа сборок генератора  $N$  приводит к уменьшению потерь энергии в разрядниках (при наличии нагрузки), то в случае последовательного соединения, наоборот, к росту потерь.

## 2.8. Экспериментальные исследования

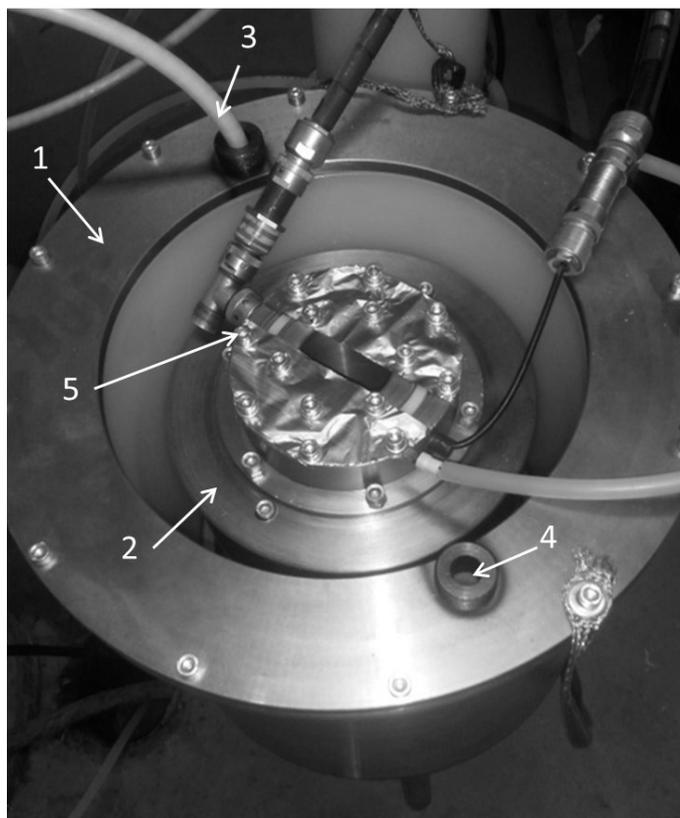
Проверим применимость одной из полученных зависимостей (2.20) для оценки потерь энергии в искровом канале разрядника при наносекундных

временах коммутации и амплитуде коммутируемого тока порядка 100 кА, то есть при условиях, характерных для работы «быстрых» к.к.с. на низкоимпедансную нагрузку. Для этого была исследована работа к.к.с. «НСЕІсар 80-0,25» на малоиндуктивную нагрузку, то есть в режиме, близком к режиму короткого замыкания при различных параметрах разрядного контура и коммутатора.

Исследование работы к.к.с. на индуктивную нагрузку проводилось на экспериментальном стенде, описанном ниже, при коммутации импульсного конденсатора через газовый разрядник (рис. 4.1 б) без управляемого электрода, встроенный внутри конденсатора и применяемый нами в этой и других моделях к.к.с. [10, 86, 87, 91]. Расстояние между основными электродами составляло 3,0 4,0 5,0 6,5 и 10,5 миллиметров. Также в ходе эксперимента дискретно изменялось давление сухого воздуха в газовом разряднике от атмосферного до 8,5 атм., в зависимости от расстояния между электродами и зарядного напряжения, которое изменялось в диапазоне 20–76 кВ. При каждом значении давления производился плавный заряд конденсатора до момента самопробоя разрядника. При пробое фиксировалось напряжение срабатывания, и регистрировались сигналы с датчиков тока. Для каждого значения давления в разряднике производилось несколько выстрелов.

Экспериментальный стенд состоит из испытательной ячейки, высоковольтного зарядного устройства, киловольтметра, системы осушки и подачи воздуха и системы регистрации. Испытательная ячейка (рис. 2.8) представляет собой металлический бак 1 без крышки, внутри которого имеется цилиндрическая полость, предназначенная для размещения испытуемого конденсатора или к.к.с. 2. На дне полости расположен металлический фланец, изолированный от корпуса на зарядное напряжение до 100 кВ, к которому через высоковольтные вводы 3 и 4 подключаются высоковольтное зарядное устройство и киловольтметр. На дне испытательной ячейки располагается еще один ввод для подачи сухого сжатого воздуха в газовый разрядник испытуемой

к.к.с.. Система регистрации включает в себя пояс Роговского и «магнитный зонд», расположенные непосредственно в закорачивающем фланце 5 для регистрации сигналов разрядного тока и его производной соответственно. Сигналы с датчиков регистрируются с помощью осциллографа Tektronix TDSK5024B.



*Рис. 2.8. Испытательная ячейка экспериментального стенда: 1 – металлический бак, 2 – испытываемая конденсаторно-коммутаторная сборка, 3 и 4 – высоковольтные вводы, 5 – закорачивающий фланец с размещенными внутри поясом Роговского и «магнитным зондом».*

На рис. 2.9 представлены типичные осциллограммы разрядного тока, зарегистрированные с помощью пояса Роговского в режиме малоиндуктивной нагрузки при зарядном напряжении  $U_C = 75$  кВ и межэлектродном промежутке газового разрядника  $s$  равном 6,5 мм и 10,5 мм. Также на рисунке представлена кривая тока, восстановленная интегрированием сигнала регистрируемого «магнитным зондом», которая по форме практически полностью совпадает с сигналом пояса Роговского. Аналогичные осциллограммы тока были получены

при других значениях межэлектродного промежутка, давления в разряднике и зарядного напряжения на конденсаторе.

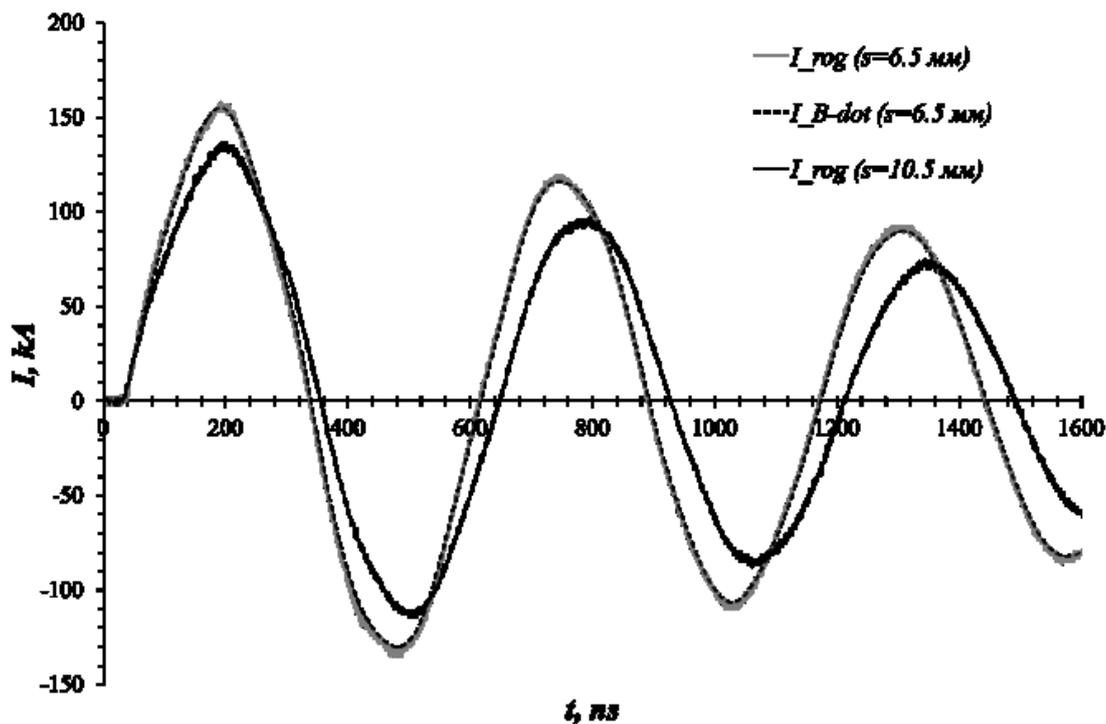


Рис. 2.9. Осциллограммы разрядного тока, зарегистрированные при разряде к.к.с. «HCEI cap 80-0.25» на малоиндуктивную нагрузку

Из полученных осциллограмм определялись полная индуктивность разрядного контура  $L_{\Sigma}$  для каждого выстрела и амплитуда первой полуволны тока  $I_{\max}$ . Как показал анализ осциллограмм, полная индуктивность разрядного контура изменялась в пределах от 29,5 до 36,5 нГн, в зависимости от величины межэлектродного расстояния и конфигурации нагрузки.

Изменение параметров разрядного контура и параметров коммутатора для проведенного исследования соответствует изменению параметра  $A$  в диапазоне 5–12. Для этого диапазона, как видно из рис. 2.7, выражение (2.20) имеет некоторое расхождение с расчетными данными. А лучшее совпадение с расчетными данными для обозначенного диапазона имеет кривая:

$$\Delta \approx \frac{7}{5 + A(1 + B)^{2/3}}. \quad (2.24)$$

Выражение (2.24), можно представить в виде

$$\Delta \approx \frac{7}{5+D}, \quad (2.25)$$

где

$$D = A(1+B)^{2/3} = \frac{1}{l_s} \left( \frac{8\pi\sigma^2}{\xi\rho} L_0^2 E_0 \right)^{1/3} \left( 1 + \frac{NL_L}{L_0} \right)^{2/3} = \frac{1}{l_s} \left( \frac{8\pi\sigma^2}{\xi\rho} E_0 L_\Sigma^2 \right)^{1/3}, \quad (2.26)$$

где  $L_\Sigma = L_0 + NL_L$  – полная индуктивность разрядного контура.

Для газового разрядника, заполненного воздухом, плотность которого при атмосферном давлении  $\rho_0 = 1.29 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma = 1.8 \cdot 10^{14}$  сек<sup>-1</sup>,  $\xi = 4.5$  [83,84] выражение (2.26) примет вид:

$$D = \frac{1,2 \cdot 10^5 (E_0 L_\Sigma^2)^{1/3}}{l_s p^{1/3}}, \quad (2.27)$$

где  $p$  – давление воздуха в атм., индуктивность в Гн, энергия в Дж, длина в см.

Выражение (2.27), полученное на основе численного моделирования, позволяет определить относительные потери энергии в искре канала разряда за первый полупериод тока. Однако на практике зачастую важнее знать потери энергии к моменту максимума тока, которые в случае низкоимпедансной нагрузки соответствуют моменту вывода всей энергии из емкостного накопителя. Как показали проведенные ранее расчеты (рис. 2.4), около 85 % от потерь энергии за первый полупериод происходят на фронте тока, поэтому для оценки относительных потерь энергии в искре канала к моменту максимума тока можно использовать выражение (2.25), умноженное на поправочный коэффициент  $k$ :

$$\Delta_{\text{Imax.P}} \approx k \frac{7}{5+D}, \quad (2.28)$$

где  $k = 0,85$ .

Относительные потери энергии в искре канала разряда к моменту максимума тока, полученные на основе экспериментальных данных, могут быть найдены по формуле

$$\Delta_{I_{max.Э}} = 1 - \frac{L_{\Sigma} I_{max}^2}{C_0 U_C^2}, \quad (2.29)$$

где  $L_{\Sigma}$  – полная индуктивность разрядного контура,  $I_{max}$  – амплитуда первой полуволны тока,  $C_0$  – емкость конденсатора к.к.с, а  $U_C$  – его зарядное напряжение (напряжение самопробоя).

Полученные в результате экспериментальных измерений значения относительных потерь в искре канала  $\Delta_{I_{max.Э}}$  в зависимости от безразмерного параметра  $D$ , найденного по формуле (2.27), представлены на рис. 2.10.

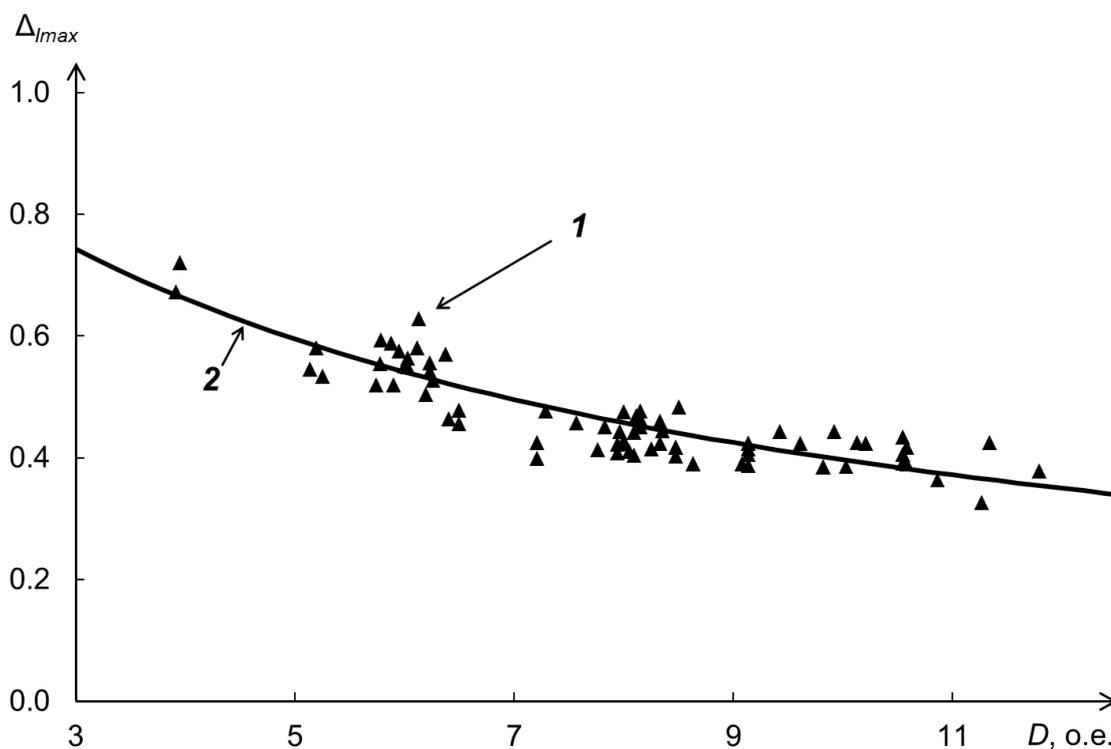


Рис. 2.10. Относительные потери в искре канала разрядника к моменту максимума тока от безразмерного параметра  $D$ , найденные в ходе испытаний сборки «НСЕІсар 80-0.25» при разряде на индуктивную нагрузку (1), а также кривая (2), соответствующая выражению (2.28)

Как видно из графика, полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетной кривой (2.28) практически для всего диапазона изменения параметра  $D$ .

Среднеквадратичное отклонение выражения (2.28) от результатов экспериментальных измерений составило

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta_{\text{Imax.P}}(D_i) - \Delta_{\text{Imax.Э}}^i}{\Delta_{\text{Imax.Э}}^i} \right)^2}{n}} \cdot 100 \% = 7.7 \% \quad (2.30)$$

где  $n$  – общее количество экспериментальных данных;  $D_i$  – значение параметра  $D$  для  $i$ -го измерения;  $\Delta_{\text{Imax.Э}}^i$  – величина относительных потерь энергии, полученная в  $i$ -м измерении;  $\Delta_{\text{Imax.P}}(D_i)$  – величина относительных потерь энергии, найденная с помощью выражения (2.28).

### Выводы

1. Анализ работы коммутаторов, основанный на использовании модели Брагинского, показал, что относительные потери в коммутаторе:
  - растут с ростом длины зазора и плотности газа в разряднике;
  - уменьшаются с ростом индуктивности контура, сопротивления нагрузки и энергии, коммутируемой через разрядник.
2. При параллельном включении нескольких сборок на общую нагрузку относительные потери в коммутаторе уменьшаются с увеличением числа сборок, причем для индуктивной и емкостной нагрузок наблюдается более слабая зависимость от числа сборок, чем для чисто активной нагрузки.
3. При последовательном включении нескольких сборок на общую нагрузку относительные потери в коммутаторе растут с увеличением числа сборок, причем для индуктивной и емкостной нагрузок также наблюдается более слабая зависимость от числа сборок, чем для чисто активной нагрузки.
4. Найденные 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 могут быть полезны при проектировании генераторов. Приведение потерь энергии к количеству сборок конденсатор-коммутатор позволяет оптимально подобрать параметры и количество обоих с целью минимизации удельных и абсолютных потерь.

5. Получены экспериментальные данные об изменении величины относительных потерь в искре канала разряда к моменту максимума тока при разряде конденсаторно-коммутаторной сборки «НСЕI cap 80-0.25» на индуктивную нагрузку в зависимости от параметров разрядного контура и параметров коммутатора. Анализ экспериментальных данных показал, что они хорошо согласуются с выражением (2.28), полученным на основе результатов численного моделирования, представленных в этой работе и в [92, 93]. Это позволяет сделать следующий вывод: модель Брагинского [83] адекватно описывает процесс развития искрового канала в сильноточных газовых коммутаторах, а формулы работ [92, 93], так же как и выражение (2.28), сформулированное в данной работе, применимы для оценки потерь энергии в искре канала разряда при работе генератора на индуктивную нагрузку.

### Глава 3. КОНДЕНСАТОРНО-КОММУТАТОРНАЯ СБОРКА НА БАЗЕ КОНДЕНСАТОРА «НСЕІсар 100-0.2»

В данной главе описана конструкция и характеристики конденсаторно-коммутаторной сборки, построенной на базе высоковольтного импульсного конденсатора «НСЕІсар 100-0.2» и многоззорного газового разрядника. Сборка разработана для применения в компактном импульсном генераторе тока «ХР-100/170», предназначенном для работы на Х-пинч нагрузку, конструкция, принцип работы и основные параметры которого также описаны в этой главе.

#### *3.1. Высоковольтный импульсный конденсатор «НСЕІсар 100-0.2»*

При создании компактного драйвера для Х-пинчей необходимым является то, чтобы он обеспечивал протекание через нагрузку тока с амплитудой около 100 кА при средней скорости нарастания более 1 кА/нс. Первый такой генератор, разработанный в ИСЭ, обеспечивал в короткозамкнутой нагрузке ток амплитудой 300 кА [38], а возможность его использования как источника тока для Х-пинча была продемонстрирована в работе [94]. В этом генераторе тока использовались четыре конденсаторно-коммутаторные сборки (к.к.с.) емкостью 0,25 мкФ каждая. Емкости соединялись параллельно и помещались в общий бак с трансформаторным маслом. При зарядном напряжении 45 кВ энергозапас генератора составлял приблизительно 1 кДж. Благодаря применению малоиндуктивных конденсаторов и разрядников, генератор обеспечивал скорость нарастания тока в Х-пинче выше критической величины 1 кА/нс при времени нарастания порядка 200 нс.

Большой практический интерес представляют генераторы, построенные на базе одной к.к.с., так как использование одной сборки (и, соответственно, одного газового разрядника) повышает надежность генератора. В этом случае одна сборка должна обеспечивать параметры тока, предъявляемые к драйверу

X-пинча. Для построения такой сборки был разработан высоковольтный импульсный конденсатор «НСЕІсар 100-0.2» (рис. 3.1 и табл. 3.1) [95], который при разряде через малоиндуктивный многоканальный газовый разрядник (рис. 3.2) обеспечивал необходимые параметры.

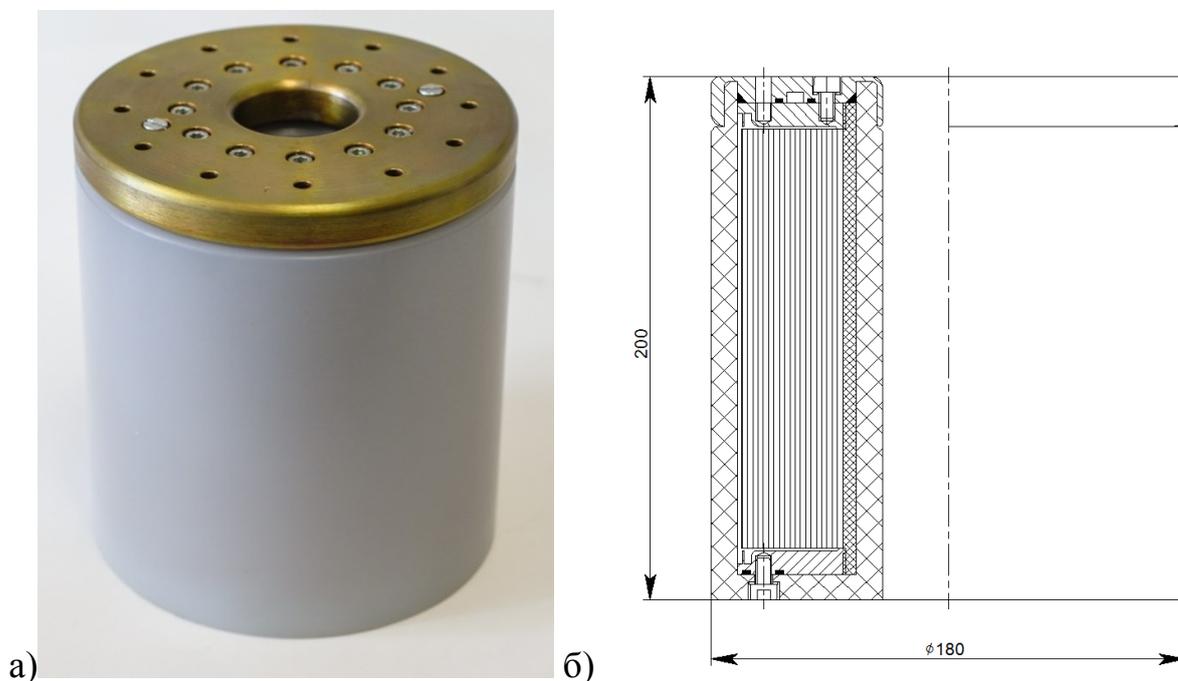


Рис. 3.1. Фото (а) и эскиз (б), с указанием габаритных размеров высоковольтного импульсного конденсатора «НСЕІсар 100-0.2»

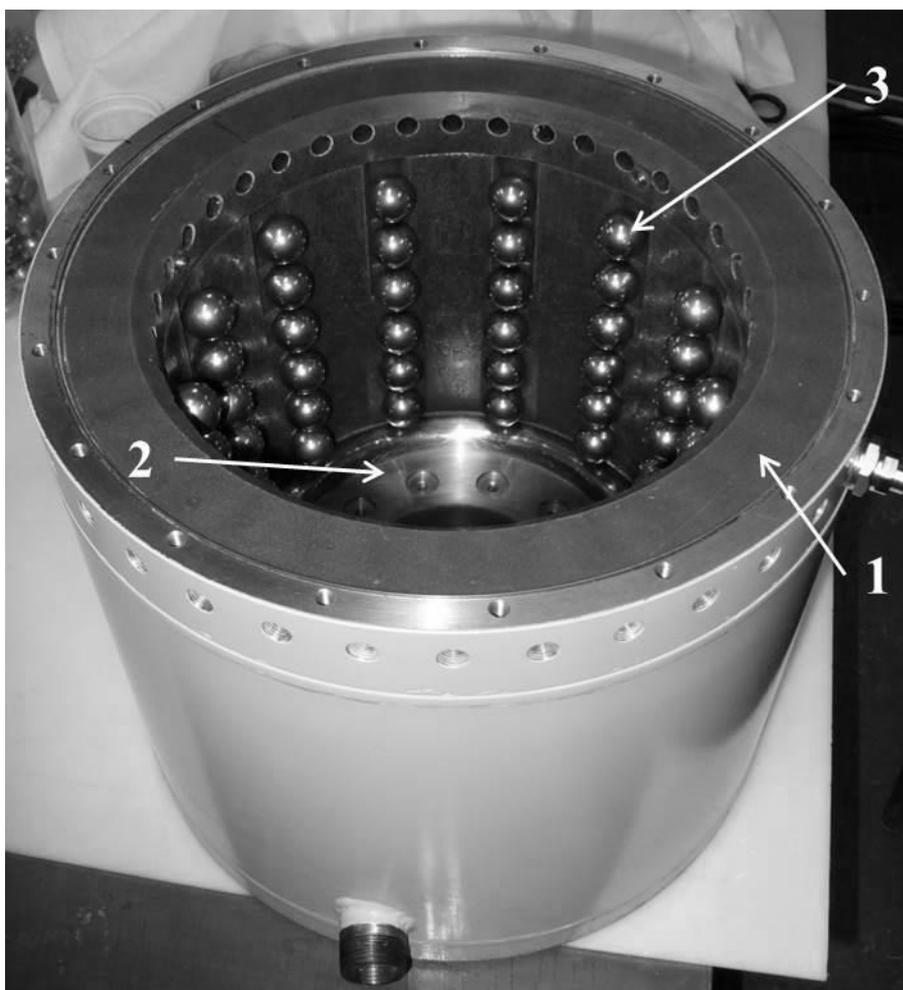
Разработанный конденсатор «НСЕІсар 100-0.2» имеет технические характеристики, представленные в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Основные характеристики конденсатора «НСЕІсар 100-0.2»

Электрическая емкость	200 нФ
Индуктивность	16 нГн
Максимальное зарядное напряжение	100 кВ
Максимальный разрядный ток	200 кА
Запасаемая энергия	до 1000 Дж
Габаритные размеры	Ø180x200 мм
Объем конденсатора	5087 см <sup>3</sup>
Удельная энергия	0,196 Дж/см <sup>3</sup>
Максимальная удельная выходная мощность, найденная по формуле (1.6)	1230 кВт/см <sup>3</sup>

### 3.2. Конденсаторно-коммутаторная сборка на базе конденсатора «НСЕІсар 100-0.2»

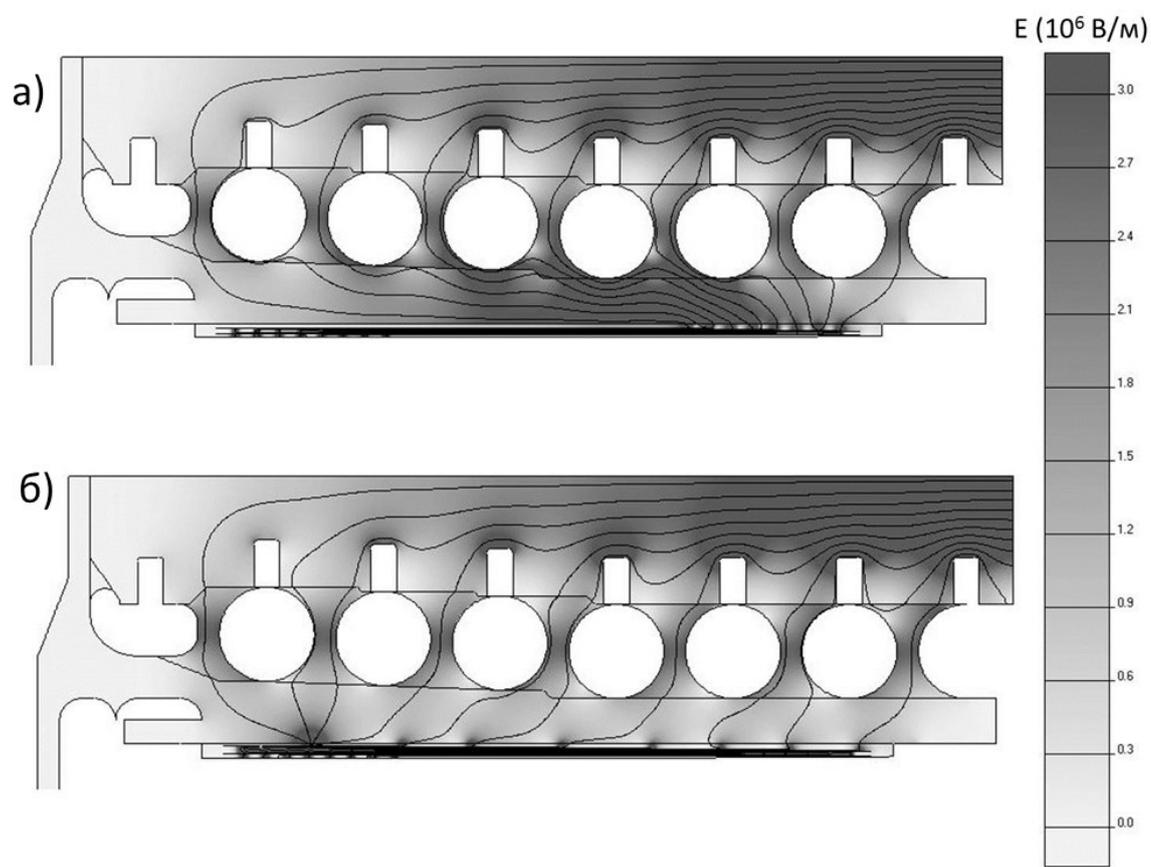
Конденсаторно-коммутаторная сборка на базе конденсатора «НСЕІсар 100-0.2» представляет собой коммутатор – многозачерный разрядник и, собственно, сам высоковольтный импульсный конденсатор, который расположен внутри разрядника [96] для минимизации суммарной индуктивности сборки. Многозачерный разрядник (рис. 3.2) представляет собой цилиндрический диэлектрический корпус из эпоксидного компаунда (рис. 3.2, поз. 1), в котором крепятся высоковольтный электрод (рис. 3.2, поз. 2), заземленный электрод (отсутствует на рис. 3.2) и промежуточные электроды - шесть рядов шаров (рис. 3.2, поз. 3), по двенадцать в каждом ряду. Диаметр шаров составляет 22 мм, а зазор между шарами соседних рядов, а также между шарами крайних рядов и высоковольтным и заземлённым электродами составляет 5 мм. Шары каждого ряда соединены между собой полупроводящим резиновым шнуром. Ряды шаров, а также высоковольтный и заземлённый электроды разрядника соединены с плечами резистивного делителя, который залит в эпоксидном компаунде. Делитель имеет семь плечей с одинаковым сопротивлением около 117 МОм, каждое из которых состоит из трех резисторов типа «КЭВ-0,5» сопротивлением 39 МОм, включенных последовательно. Делитель обеспечивает равномерное распределение потенциалов между рядами шаров и электродами разрядника на стадии зарядки конденсатора.



*Рис. 3.2. Малоиндуктивный многозазорный газовый разрядник. 1 – диэлектрический корпус из эпоксидного компаунда, 2 – высоковольтный электрод, 3 – промежуточные электроды сферической формы.*

Одна из проблем, которую необходимо было решать при проектировании этой сборки, это взаимное влияние электрического поля, создаваемого электродами разрядника и обкладками крайних секций конденсатора. В случае применения стандартной схемы намотки, то есть когда все обкладки крайней секции конденсатора имеют одинаковую ширину 110 мм и смещены друг относительно друга на 5 мм, происходит неравномерное распределение потенциала вдоль поверхности изоляционного корпуса конденсатора, прилегающего к электродам разрядника (рис. 3.3, 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 ( $E_{\text{пр}}=31$  кВ/см) и нарушает нормальную работу многозазорного газового разрядника. Для решения обозначенной проблемы была разработана специальная схема намотки крайних секций конденсатора (рис. 3.4), применение которой позволило равномерно распределить напряжение вдоль изоляционного корпуса конденсатора, прилегающего к электродам разрядника (рис. 3.3, 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.



*Рис. 3.3. Картина электростатического поля вблизи электродов газового разрядника и корпуса конденсатора «НСЕІсар 100-0.2» при использовании стандартной (а) и специальной (б) схем намотки. Расчет произведен в программе ELCUT [97]*

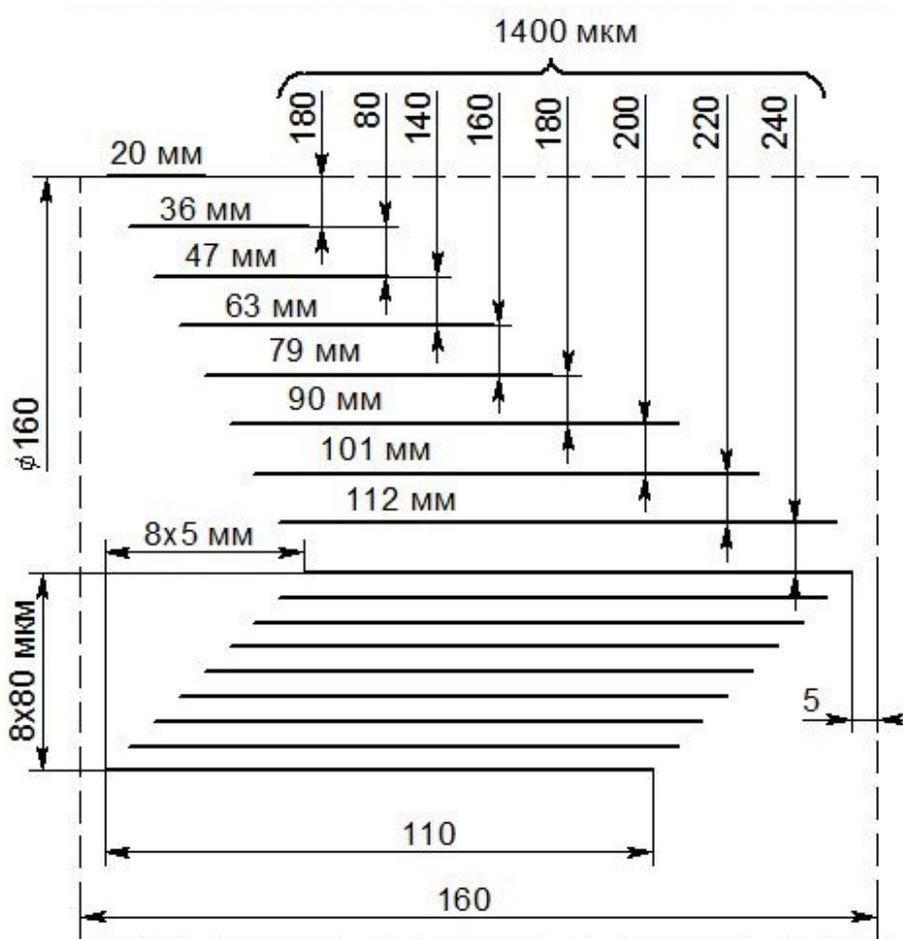


Рис. 3.4. Схема расположения обкладок последних двух секций конденсатора «НСЕІсар 100-0.2»

Как показали результаты испытания конденсаторно-коммутаторной сборки (рис.Рис. 3.5), в режиме короткого замыкания при зарядном напряжении конденсатора 90 кВ она способна обеспечить тока амплитудой 200 кА, при времени нарастания 100 нс – до уровня 180 кА [95]. Суммарная индуктивность сборки, рассчитанная на основе полученных осциллограмм, составляет 20 нГн, а сопротивление разрядного контура порядка 30 мОм.

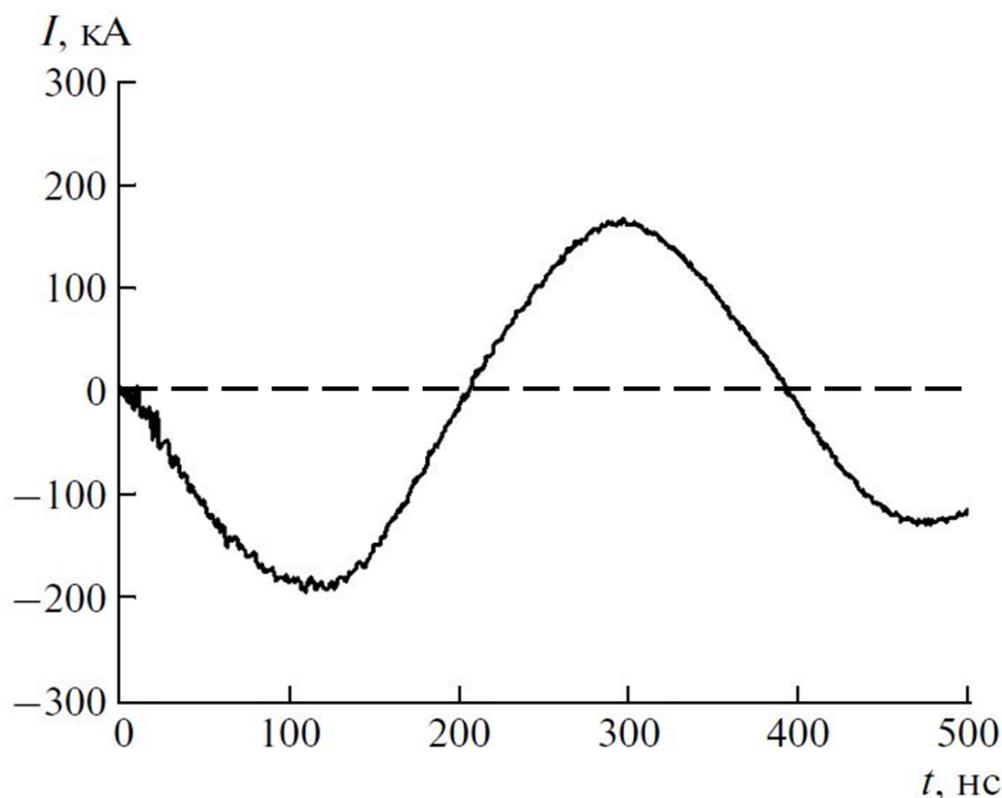


Рис. 3.5. Оциллограмма разрядного тока, зарегистрированная при разряде к.к.с. «НСЕІсар 100-0.2» в режиме короткого замыкания

Испытание сборки при работе на согласованную нагрузку не проводилось, однако, если оценивать максимальную удельную выходную мощность конденсатора с помощью выражения (1.6) получим:

$$P_{\max} = \frac{0,3U_0^2}{V_C \sqrt{L_{PK}/C_0}} = \frac{0,3(95 \cdot 10^3)^2}{5087 \sqrt{20 \cdot 10^{-9} / 200 \cdot 10^{-9}}} = 1683 \text{ кВт/см}^3, \quad (3.1)$$

где  $V_C=5087 \text{ см}^3$  – объём конденсатора.

Если учитывать объем, занимаемый разрядником, то удельная выходная мощность сборки:

$$P_{\max} = \frac{0,3U_0^2}{V_K \sqrt{L_{PK}/C_0}} = \frac{0,3(95 \cdot 10^3)^2}{23777 \sqrt{20 \cdot 10^{-9} / 200 \cdot 10^{-9}}} = 360 \text{ кВт/см}^3, \quad (3.2)$$

где  $V_K=23777 \text{ см}^3$  – объём, занимаемый конденсаторно-коммутаторной сборкой.

Основные параметры сборки представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Основные характеристики к.к.с. на базе конденсатора «НСЕІсар 100-0.2»

Электрическая емкость	200 нФ
Индуктивность	20 нГн
Максимальное зарядное напряжение	95 кВ
Амплитуда тока в режиме КЗ	200 кА
Время нарастания тока до уровня 180 кА	100 нс
Средняя скорость нарастания тока до 180 кА	1,8 кА/нс
Габаритные размеры	Ø326x285 мм
Объём к.к.с.	23777 см <sup>3</sup>
Запасаемая энергия	до 900 Дж
Максимальная мощность в согласованной нагрузке	8,5 ГВт
Время нарастания мощности до максимума	75 нс
Удельный энергозапас к.к.с.	0,04 Дж/см <sup>3</sup>
Максимальная удельная выходная мощность к.к.с., рассчитанная по формуле (1.6)	360 кВт/см <sup>3</sup>

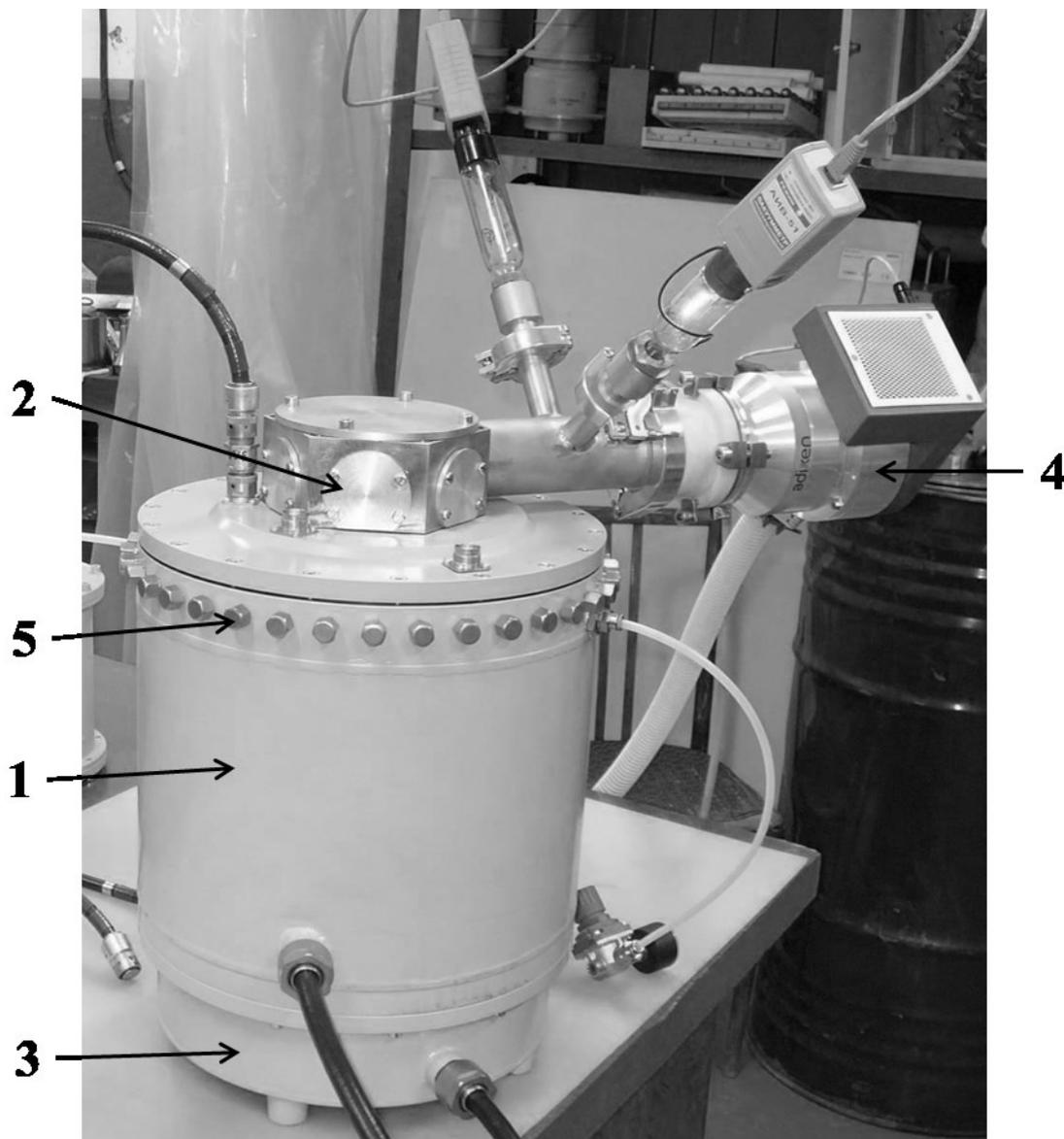
Невысокая удельная мощность всей сборки, обусловленная относительно большими габаритными размерами разрядника, не позволяет применять её для построения мощных драйверов, состоящих из нескольких к.к.с.

Однако данная сборка имеет высокое значение таких параметров, как амплитуда и средняя скорость нарастания тока, сочетание которых не было достигнуто прежде с помощью лишь одной к.к.с. Это даёт возможность использовать саму сборку в качестве базового элемента для построения компактного импульсного генератора тока – драйвера X-пинч нагрузки.

### 3.3. Компактный импульсный генератор тока «XP-100/170»

Импульсный генератор тока состоит из базового моноблока (рис. 3.6), объединяющего к.к.с. на базе конденсатора «НСЕІсар 100-0.2» (рис. 3.6, поз. 1), узел нагрузки (рис. 3.6, поз. 2) и коллектор многоканальной системы запуска

(рис. 3.6, поз. 3), расположенный снизу сборки. Также в состав импульсного генератора входят блок высоковольтного запуска, зарядное устройство, вакуумная система (рис. 3.6, поз. 4) и система регистрации.



*Рис. 3.6. Базовый моноблок импульсного генератора тока «XP-100/170»: 1 – к.к.с. на базе конденсатора «НСЕІсар 100-0.2», 2 – узел нагрузки, 3 – коллектор многоканальной системы запуска, 4 – вакуумная система, 5 – гнезда для установки плавких предохранителей*

Основные характеристики импульсного генератора тока «XP-100/170» представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Основные 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 на индуктивной нагрузке 4 нГн, кА	170
Предельный ток на нагрузке X-пинч, кА	150
Время нарастания тока на X-пинче, нс	130±15
Вес базового моноблока, кг	76

Принципиальная электрическая схема генератора представлена на рис 3.7.

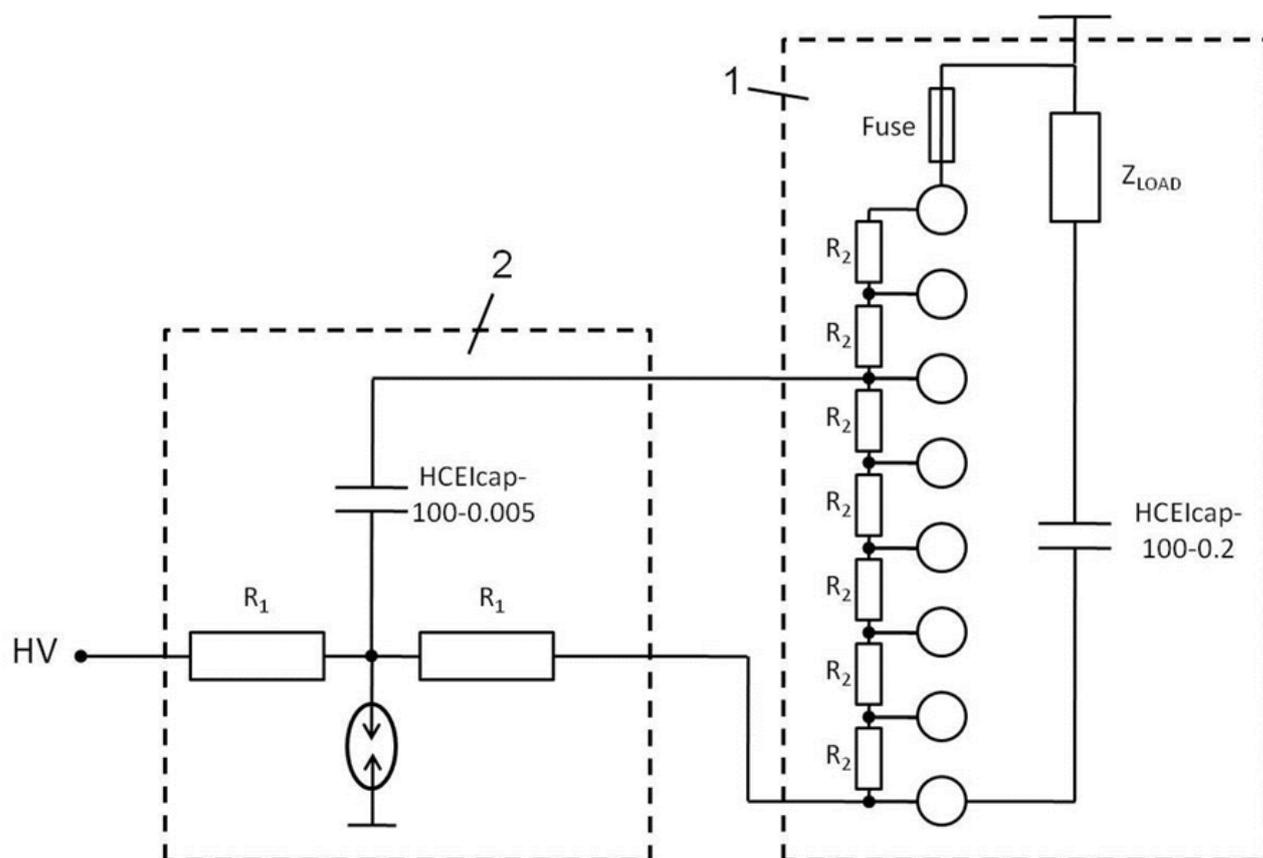


Рис. 3.7. Принципиальная электрическая схема импульсного генератора тока «ХР-100/170»: 1 – базовый моноблок, 2 – блок высоковольтного запуска

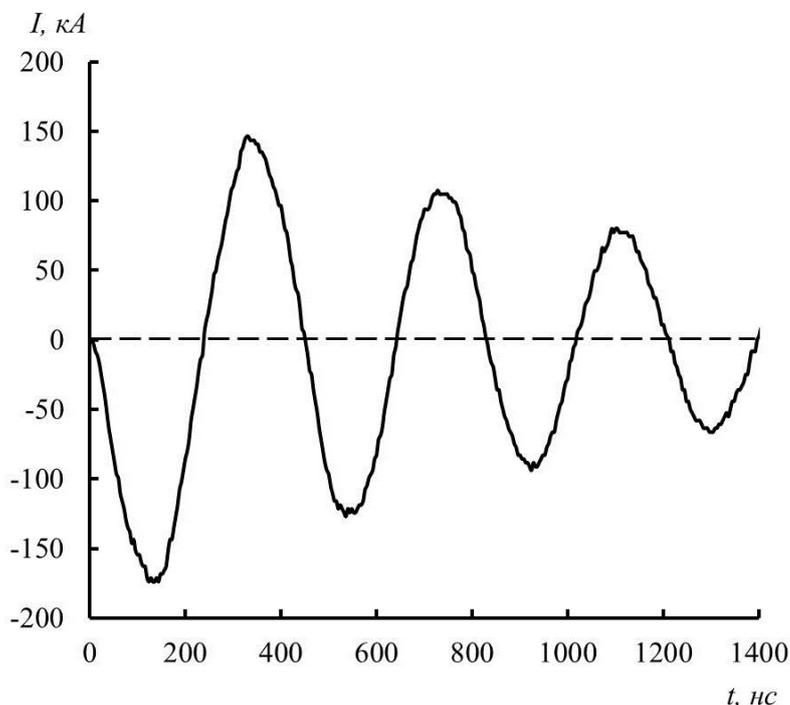
Принцип работы генератора:

От зарядного устройства происходит параллельное зарядание до заданного напряжения высоковольтного импульсного конденсатора

«НСЕІсар 100-0.005», расположенного в блоке высоковольтного запуска (рис. 3.7, поз. 2) и высоковольтного импульсного конденсатора «НСЕІсар 100-0,2», расположенного в базовом моноблоке (рис. 3.7, поз. 1) через зарядные резисторы  $R_1 = 1$  кОм. Благодаря высокоомному делителю, состоящему из цепочки резисторов  $R_2 \approx 117$  МОм, включенных последовательно, происходит равномерное распределение потенциалов между рядами шаров многоззорного разрядника. При сбросе давления в газовом разряднике блока высоковольтного запуска (или ином способе его запуска) происходит его пробой. В результате происходит заземление одного электрода конденсатора «НСЕІсар 100-0.005», а на другом появляется высоковольтный запускающий импульс обратного знака, который с помощью многоканальной системы запуска подается по 12-ти каналам на каждый шар третьего ряда многоззорного разрядника. Импульс отрицательной полярности приводит к сильному искажению поля в многоззорном разряднике и, как следствие, к его пробую. В результате пробоя многоззорного разрядника происходит разряд импульсного конденсатора «НСЕІсар 100-0.2» на нагрузку. Для увеличения срока службы конденсатора в разрядную цепь могут быть включены плавкие предохранители, для установки которых предусмотрены специальные посадочные гнезда (рис. 3.6, поз. 5). При правильном подборе количества предохранителей, включенных в разрядную цепь импульсного конденсатора, они резко увеличивают собственное сопротивление к концу первого полупериода тока. Это приводит к уменьшению величины тока обратной полярности и величины обратного напряжения на конденсаторе, что значительно увеличивает ресурс работы импульсного конденсатора в данном режиме [98].

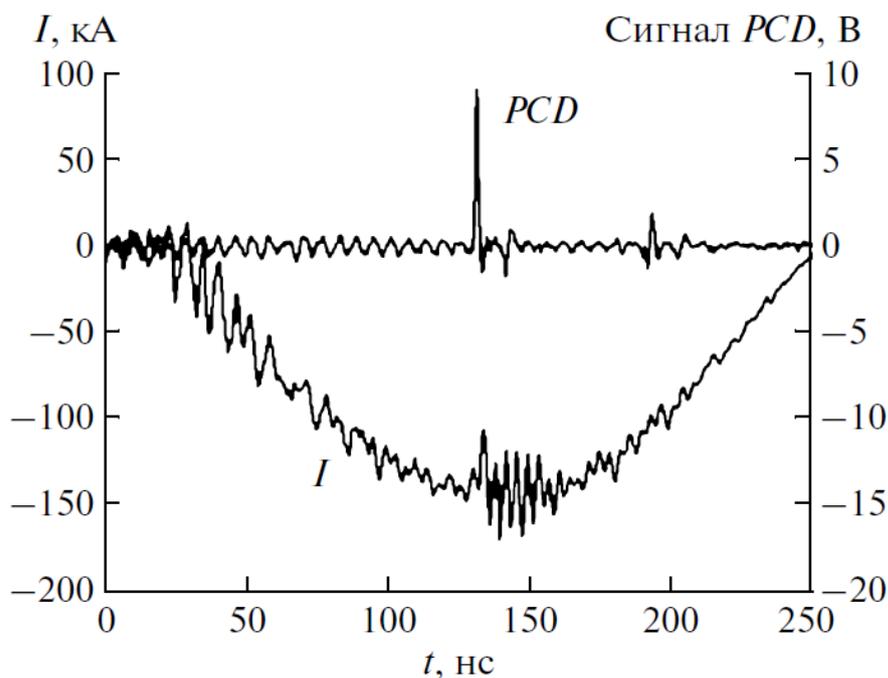
Были проведены испытания импульсного генератора при работе на эквивалент нагрузки – металлический стержень диаметром 6 мм, установленный по центру вакуумного диода вместо X-пинч нагрузки. Как показали результаты испытаний (рис. 3.8), при работе на эквивалент нагрузки генератор способен обеспечить в ней ток амплитудой до 170 кА с временем

нарастания 120 нс при зарядном напряжении 90 кВ. Суммарная индуктивность разрядного контура, найденная из осциллограммы тока, при этом составляет порядка 24 нГн, то есть индуктивность узла нагрузки составляет порядка 4 нГн.



*Рис. 3.8. Осциллограмма разрядного тока, зарегистрированная при работе импульсного генератора тока на эквивалент нагрузки ( $L = 4$  нГн) при зарядном напряжении конденсатора 90 кВ.*

Полученные параметры импульсного генератора тока позволяют применять его для работы на X-пинч нагрузку с целью получения источника мягкого рентгеновского излучения, что было подтверждено экспериментально. Например, при работе импульсного генератора тока на X-пинч нагрузку виде двух молибденовых проволочек  $\varnothing 25$  мкм, скрещенных под углом  $74^\circ$ , были получены временные зависимости тока в нагрузке и импульса рентгеновского излучения, представленные на рис. 3.9 [95].



*Рис. 3.9. Осциллограммы тока и алмазного рентгеновского диода, зарегистрированные при работе к.к.с. «НСЕІсар 100-0.2» на нагрузку виде двух молибденовых проволочек Ø25 мкм*

### **Выводы**

1. Разработана специальная схема намотки крайних секций конденсатора «НСЕІсар 100-0.2», которая позволяет равномерно распределить напряжение вдоль внешней поверхности его корпуса, что обеспечивает работоспособность многоззорного газового разрядника, совместно с которым они образуют конденсаторно-коммутаторную сборку.
2. На базе конденсатора «НСЕІсар 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 амплитудой до 170 кА при времени нарастания 120 нс. Указанные параметры позволяют применять генератор «ХР-100/170» для работы на X-пинч нагрузку с целью получения источника мягкого рентгеновского излучения.

## Глава 4. КОМПАКТНЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ НАНОСЕКУНДНЫЙ ГЕНЕРАТОР НА БАЗЕ КОНДЕНСАТОРНО-КОММУТАТОРНОЙ СБОРКИ «НСЕІсар 80-0.25»

В этой главе описаны конструкция и характеристики конденсаторно-коммутаторной сборки «НСЕІсар 80-0.25», которая нашла применение в качестве базового элемента в составе компактного сильноточного наносекундного генератора тока. Параметры тока, обеспечиваемые генератором в низкоимпедансной нагрузке, и небольшие массогабаритные характеристики позволили применить его в качестве драйвера X-пинч нагрузки в составе нескольких радиографов, конструкция и характеристики которых также описаны в этой главе.

### *4.1. Конденсаторно-коммутаторная сборка «НСЕІсар 80-0.25»*

Конденсаторно-коммутаторная сборка «НСЕІсар 80-0.25», аналогично предшествующим моделям [86, 87, 91], представляет собой высоковольтный сильноточный малоиндуктивный импульсный конденсатор с коммутатором, помещенным по центру внутри конденсатора (рис. 4.1) [99]. Данная конструкция позволяет получить низкую суммарную индуктивность и тем самым повысить скорость вывода энергии, запасенной в конденсаторе. К.к.с. имеет габариты  $\varnothing 204 \times 250$  мм и вес  $\sim 15$  кг. Высоковольтный импульсный конденсатор имеет электрическую емкость 250 нФ и рабочее напряжение 80 кВ. При таком зарядном напряжении рабочая напряженность составляет  $E = 167$  кВ/мм, а энергия, запасаемая в конденсаторе,  $W_C = 800$  Дж. Конденсатор имеет объем активной части  $3,3$  дм<sup>3</sup>, т. е. плотность энергии, запасаемой в активной части конденсатора составляет  $w = 240$  Дж/дм<sup>3</sup>.

Коммутатор представляет собой трёхэлектродный газовый разрядник повышенного давления (до 8 атм.), управляемый по принципу искажения поля (рис. 4.1). Расстояние между основными электродами 2 составляет 6–10 мм.

Управляющий электрод 3 выступает в разрядный промежуток со стороны одного из основных электродов на расстояние 2 мм от его торца. При заряде конденсатора на управляющем электроде с помощью внешнего делителя напряжения задается потенциал  $1/3U_C$ , а при запуске на него подается импульс обратной полярности  $-U_C$ .

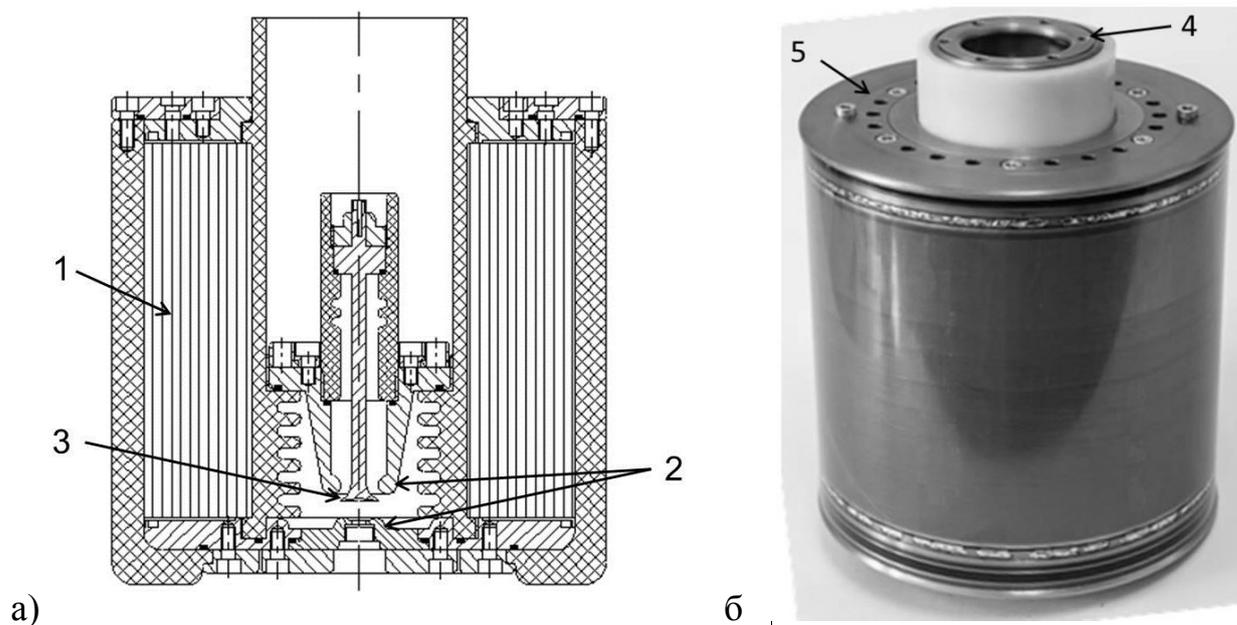
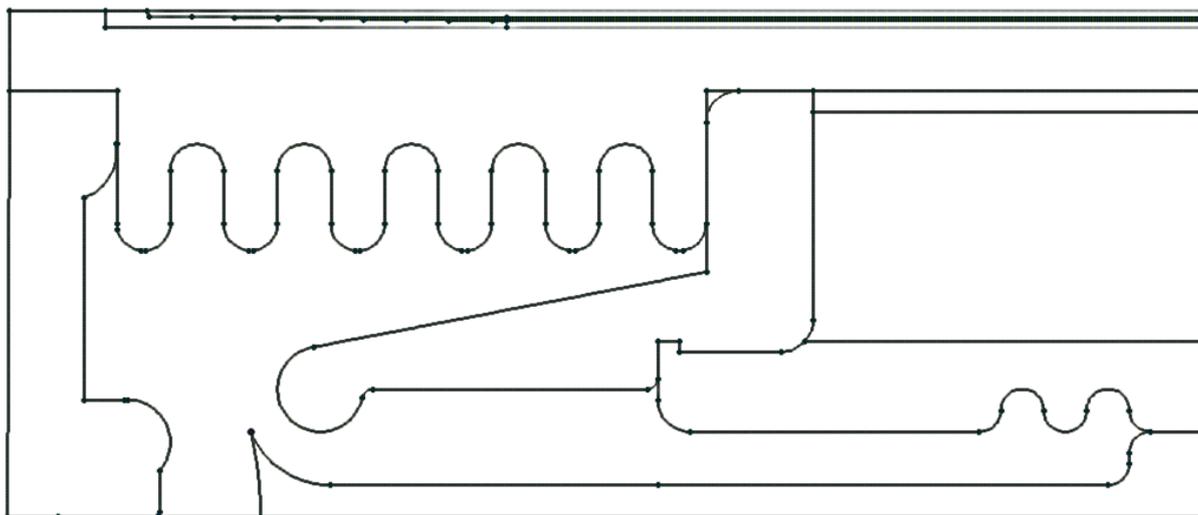


Рис. 4.1. Схема (а) и фотография (б) к.к.с. «HSEIcar 80-0.25»: 1 – высоковольтный импульсный конденсатор, 2 – основные электроды разрядника, 3 – управляющий электрод, 4 и 5 – выводы для подключения нагрузки

При проектировании к.к.с. «HSEIcar 80-0.25» необходимо было учесть взаимное влияние электрических полей, создаваемых крайними секциями конденсатора и электродами разрядника на различных стадиях работы сборки. Для этого рассчитывалась картина электрического поля в статике для трёх основных стадий работы сборки: заряд конденсатора, запуск разрядника и разряд конденсатора через разрядник.

Расчет стационарных электрических полей проводился с помощью программы ELCUT [97].

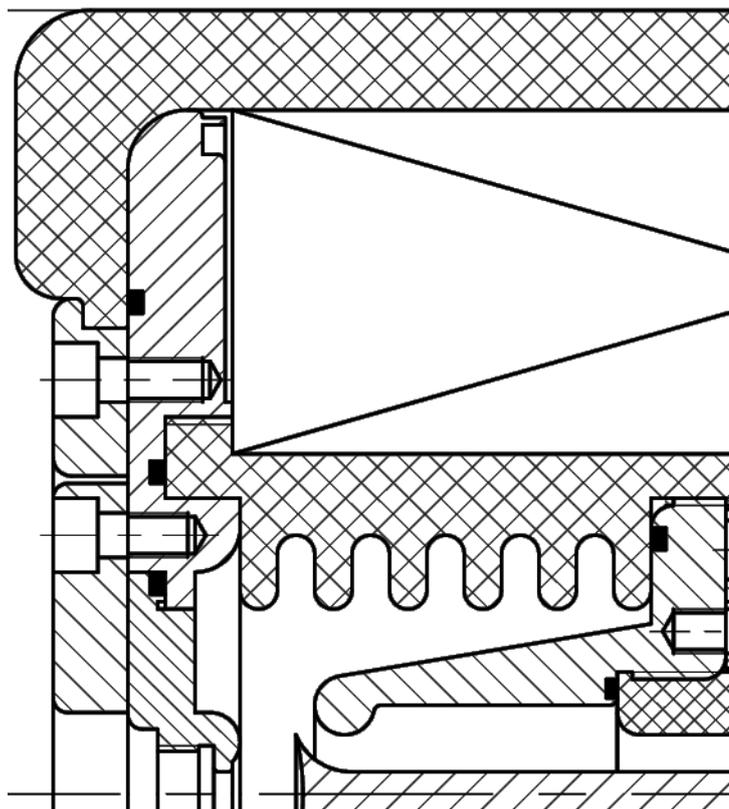


*Рис. 4.2. Геометрическая осесимметричная модель к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25»*

На рис. 4.2 представлена осесимметричная геометрическая модель конденсаторно-коммутаторной сборки. Построив сетку и задав граничные условия, решаем задачу электростатики для определения характеристик поля.

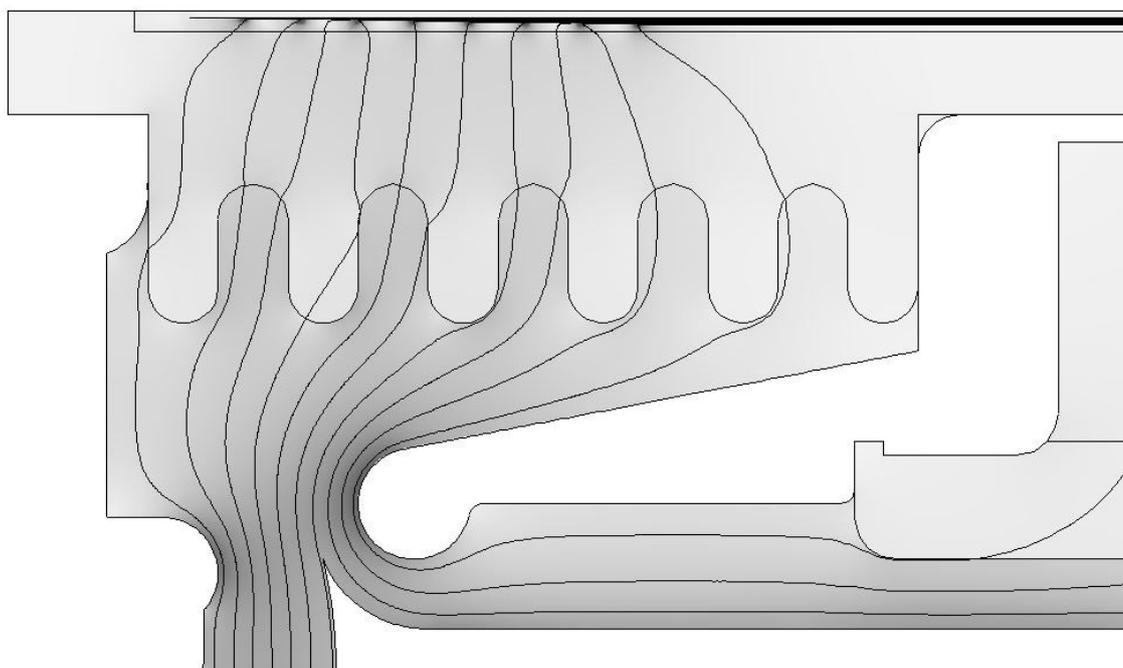
#### *4.1.1. Процесс заряжения конденсатора*

В данном процессе наибольший интерес представляет картина поля в области обкладок крайней секции конденсатора, электродов разрядника и изолятора (рис. 4.3).



*Рис. 4.3. Эскиз к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25» в разрезе в области расположения газового разрядника*

Картина статического электрического поля в данной области имеет вид, представленный на рис. 4.4.



*Рис. 4.4. Картина статического электрического поля в области газового разрядника в момент заряда конденсатора до рабочего напряжения 80 кВ. Шаг эквипотенциалей – 8 кВ.*

Полученные значения максимальных напряженностей в различных элементах изоляции и значения пробивных напряженностей для сравнения представлены в табл. 4.1. Как видно из таблицы, значения максимальных напряженностей ни в одном элементе изоляции не превышают пробивных значений, следовательно, теоретически данная конструкция обеспечивает необходимую электрическую прочность для заданного уровня рабочего напряжения.

Таблица 4.1. Результаты расчета электростатической картины поля в области газового разрядника в момент заряда конденсатора

Элемент конструкции	Максимальная напряженность $E_M$ , кВ/мм	Пробивная напряженность $E_{пр}$ , кВ/мм
Бумажно-пленочная изоляция, пропитанная касторовым маслом	166	>208
Капролоновый изолятор	4	100
Сухой воздух (3 атм.)	7	9

#### 4.1.2. Момент запуска разрядника

Как уже отмечалось выше, запуск разрядника осуществляется путем подачи импульса напряжения обратной полярности амплитудой  $U_{\text{trig}} = -2/3U_0$ , где  $U_0$  - напряжение заряда конденсатора. При приходе импульса напряжения на пусковой электрод картина электростатического поля будет иметь вид представленный на рис. 4.5.

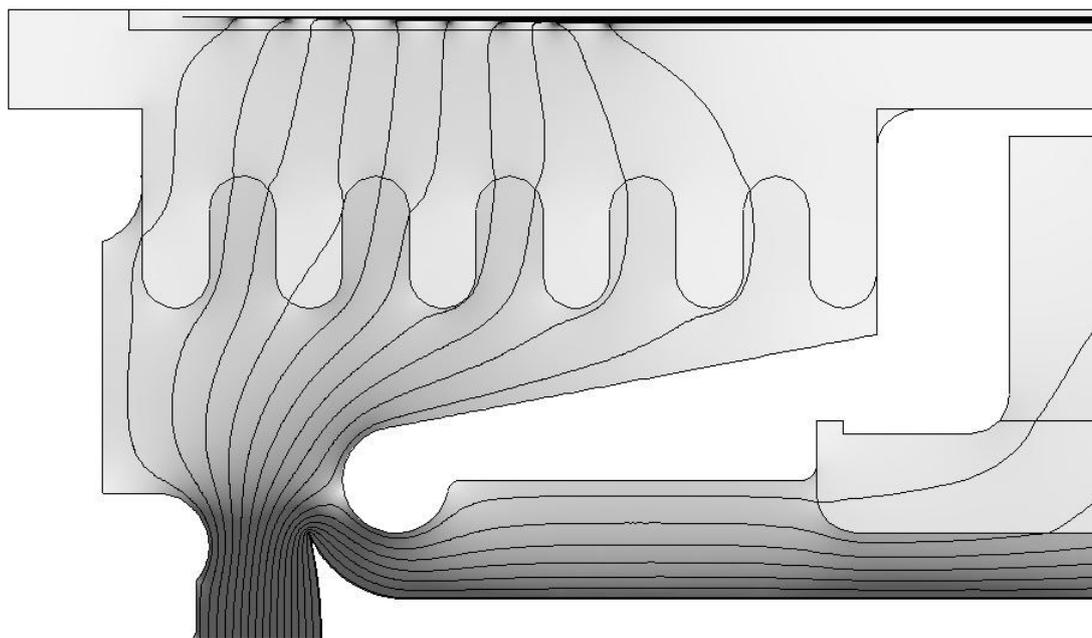


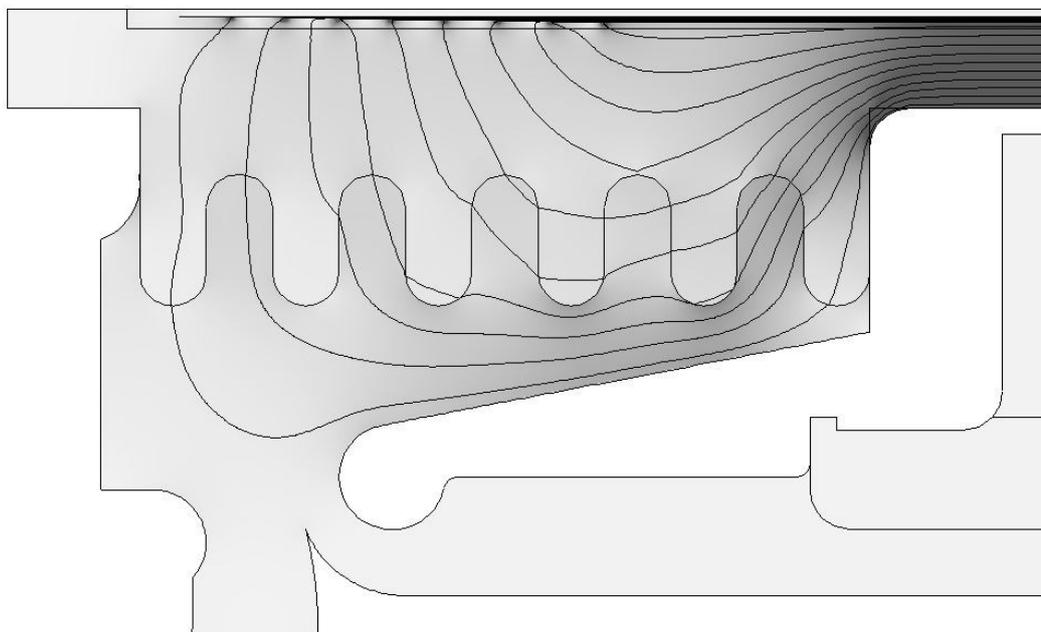
Рис. 4.5. Картина статического электрического поля в области газового разрядника в момент прихода запускающего импульса ( $-53$  кВ) на пусковой электрод. Шаг эквипотенциалей –  $8$  кВ.

Для данной картины поля электрическая напряженность на высоковольтном электроде составляет  $11$  кВ/мм, на заземленном электроде –  $8$  кВ/мм, а на кромке запускающего электрода  $\sim 15$  кВ/мм. Значения напряженности на кромке почти в  $2$  раза превышают пробивную напряженность для данного давления газа, что, совместно с равенством напряженностей в обоих направлениях от пускового электрода, должно обеспечивать практически одновременный пробой обоих газовых промежутков. Высокая степень перенапряжения обеспечивает малое время и разброс

запаздывания пробоя (результаты измерений времени запаздывания и разброса срабатывания 4-х разрядников представлены в конце второго параграфа главы 4).

#### *4.1.3. Пробой разрядника и разряд конденсатора*

При данном процессе наибольший интерес представляет картина электростатического поля на краях обкладок конденсатора и в капролоновом изоляторе в области заземленного электрода, т. к. при пробое разрядника происходит выравнивание потенциалов основных электродов разрядника и картина поля существенно меняется (рис. 4.6).



*Рис. 4.6. Картина статического электрического поля в области газового разрядника в момент пробоя разрядника. Шаг эквипотенциалей – 8 кВ*

Результаты расчетов показали, что, несмотря на значительное увеличение напряженности в капролоновом изоляторе с 4 до 11 кВ/мм, данное значение не превышает пробивное. Напряженность же на краях обкладок конденсатора меняется совсем не значительно (увеличивается менее чем на 1 %), а значит, данный процесс не оказывает существенного влияния на работоспособность

сборки. Выводы о работоспособности разработанной к.к.с., сделанные на основе теоретических расчетов, нашли экспериментальное подтверждение в ходе высоковольтных испытаний на стенде, описанном в предыдущей главе, в режиме аperiodического разряда на водяной резистор.

Одной из областей применения, разработанной к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25», является работа на низкоимпедансную нагрузку в составе компактного драйвера X-пинча, что предполагает высокочастотный (порядка 1 МГц) колебательный характер разряда с переполяризацией напряжения на конденсаторе до уровня 80 % от зарядного напряжения и при амплитуде разрядного тока в десятки килоампер. Такой режим работы высоковольтного импульсного конденсатора является наиболее тяжелым, с точки зрения нагрузки на изоляцию конденсатора и электродинамического воздействия на его токоведущие части. Для проверки работоспособности конденсатора в таком режиме, а также для определения максимальных выходных параметров всей сборки была исследована работа к.к.с. в режиме короткого замыкания (подробно описано в главе 2, параграф 8). Результаты испытаний показали, что в зависимости от расстояния между основными электродами газового разрядника, который изменялся от 3,0 до 10,5 мм, суммарная индуктивность сборки менялась в диапазоне 29 – 32 нГн. Наиболее оптимальным расстоянием между основными электродами разрядника, при котором наблюдаются его устойчивая работа и наименьшая индуктивность разрядного контура, а также наименьшие потери энергии в искре канала разряда, является расстояние 5–6 мм. При таком зазоре сборка имеет суммарную индуктивность 30 нГн и способна в режиме короткого замыкания обеспечить ток амплитудой около 160 кА при времени нарастания порядка 150 нс. Получившиеся параметры разрядного тока позволили применить разработанную конденсаторно-коммутаторную сборку для создания компактных сильноточных наносекундных генераторов, построенных на базе нескольких к.к.с. [100, 101].

Испытание сборки при работе на согласованную нагрузку не проводилось, однако, если оценивать её максимальную удельную выходную мощность с помощью выражения (1.6) получим:

$$P_{\max} = \frac{0,3U_0^2}{V_K \sqrt{L_{PK}/C_0}} = \frac{0,3(80 \cdot 10^3)^2}{6437 \sqrt{31 \cdot 10^{-9} / 250 \cdot 10^{-9}}} = 847 \text{ кВт/см}^3, \quad (3.3)$$

где  $V_K = 6437 \text{ см}^3$  – объём, занимаемый конденсаторно-коммутаторной сборкой.

Тогда абсолютная выходная мощность сборки равна:

$$P_{\max} = p_{\max} V_K = 847 \cdot 10^3 \cdot 6437 = 5,5 \text{ ГВт} \quad (3.4)$$

Сравним выходные характеристики разработанной к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25» и других наиболее мощных сборок, построенных на базе серийно выпускаемых конденсаторов GA и различных малоиндуктивных разрядников [51, 52, 102], которые применяются для построения «быстрых» LTD-ступеней [30, 32, 33]. Удельную и абсолютную максимальные выходные мощности находили с помощью выражений (3.3) и (3.4) соответственно. При этом объём  $V_K$ , занимаемый сборкой, находился как суммарная площадь занимаемая конденсатором  $S_C$  и разрядником  $S_P$ , умноженная на наибольшую высоту сборки  $H_K$  (рис. 4.7)

$$V_K = (S_C + S_P)H_K. \quad (3.5)$$

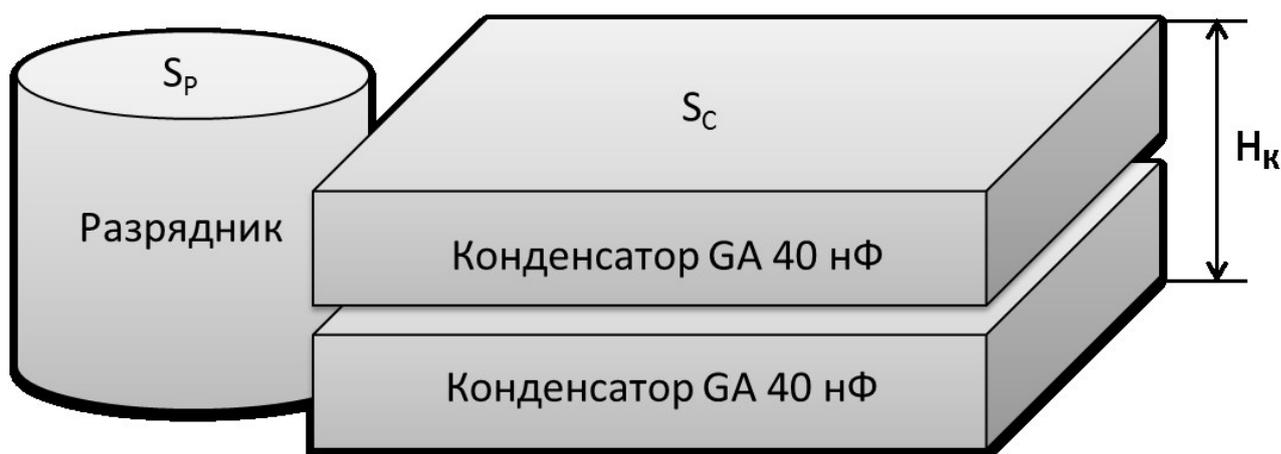


Рис. 4.7. Схематичное изображение сборки из двух конденсаторов GA и малоиндуктивного разрядника

Для сборки на базе разрядника «FAST LTD», разработанного в ИСЭ [102], высоту сборки  $H_K$  приняли равной высоте разрядника:  $H_P = 15,9$  см. Для остальных сборок, построенных на базе более компактных разрядников «L3» и «Kintech 2» (табл. 4.2) [51, 52] высоту  $H_K$  приняли равной сумме высот двух конденсаторов ( $H_C = 5,8$  см) и высоты разделяющего их изолятора ( $H_{И}=1$  см), то есть  $H_K = 2H_C + H_{И}=12,6$  см.

Найденные выходные параметры разработанной сборки «HCEIcap 80-0.25» и сборок на базе серийно выпускаемых конденсаторов GA сведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Основные выходные параметры различных «быстрых» к.к.с.

Параметр	HCEIcap 80-0.25	40нФ + «FAST LTD»	40 нФ + «L3»	40 нФ + «Kintech2»
Зарядное напряжение, кВ	80	±100	±100	±100
Суммарная емкость, нФ	250	20	20	20
Индуктивность к.к.с., нГн	31	185	155	139
Объём к.к.с., см <sup>3</sup>	6437	7002	4964	4137
Энергозапас, Дж	<b>800</b>	400	400	400
Максимальная мощность, ГВт	<b>5,5</b>	4	4,3	4,5
$t_{Pmax}$ , нс	104	72	66	62
Удельный энергозапас, Дж/см <sup>3</sup>	<b>0,124</b>	0,057	0,081	0,097
Удельная мощность, кВт/см <sup>3</sup>	850	565	870	1100

Как видно из сравнительной таблицы, разработанная сборка превосходит другие «быстрые» к.к.с., построенные на серийно выпускаемых конденсаторах, по абсолютному и относительному энергозапасу, а также по абсолютному значению максимальной выходной мощности. По удельной мощности разработанная к.к.с. превосходит сборку с разрядником «FAST LTD» и незначительно уступает сборке, построенной с использованием малоиндуктивного разрядника «L3». Сборке с разрядником «Kintech 2» разработанная к.к.с. по этому же показателю уступает почти на 30 %, что, однако, может быть скомпенсировано при построении LTD-ступеней за счет возможности более компактного размещения к.к.с. цилиндрической формы, по сравнению со сборкой, изображенной на рис. 4.7. Заметим также, что рабочее давление разрядника для сборки «HCEIcar 80-0.25» не превышает 7 атм., для сравнения рабочее давление разрядника «L3» составляет 6,8–10,2 атм. (100–150 psia), а разрядника «Kintech 2» – 15,6–18,4 атм. (230–270 psia) [52]. Столь высокий уровень рабочего давления у последнего газового разрядника представляет определенные неудобства при эксплуатации. Так, например, механическое повреждение одного из разрядников (взрыв) может привести к повреждению других разрядников, вызвав цепную реакцию, и повреждению прочих элементов LTD -ступени.

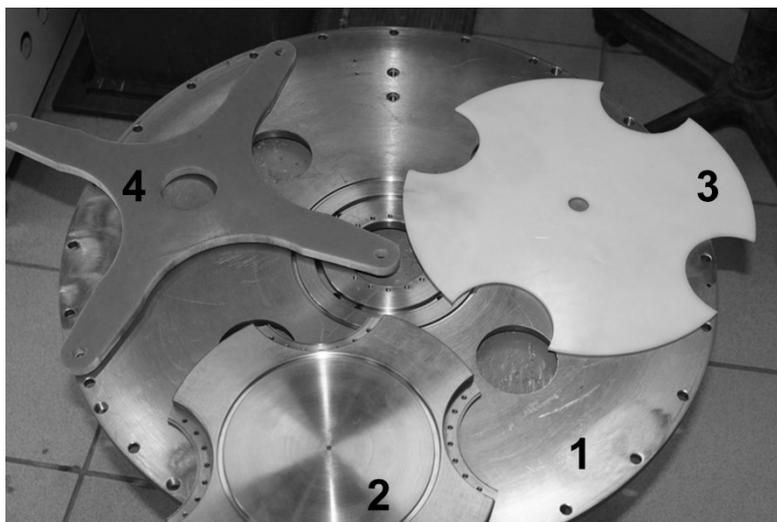
#### *4.2. Компактный сильноточный наносекундный генератор на базе к.к.с. «HCEIcar 80-0.25»*

На базе конденсаторно-коммутаторной сборки «HCEIcar 80-0.25» был разработан компактный сильноточный наносекундный генератор. Генератор представляет собой батарею из четырёх к.к.с. «HCEIcar 80-0.25» (рис. Рис. 4.8), включенных параллельно на общую передающую линию и/или нагрузку. Каждая к.к.с. одним из своих выводов (рис. 4.1, поз. 4) крепится к металлической крышке (рис. 4.9, поз. 1). Второй вывод (рис. 4.1, поз. 5) каждой к.к.с. подключен к общему металлическому диску (рис. 4.9, поз. 2). Крышка и

диск, изолированные друг от друга полиэтиленовым изолятором (рис. 4.9, поз. 3), образуют малоиндуктивную дисковую передающую линию, к которой по центру непосредственно [100] или через другую передающую линию [101] подключается нагрузка. Для придания дополнительной механической прочности диск и изолятор поджимаются к крышке стеклотекстолитовой крестовиной (рис. 4.9, поз. 4). Батарея из четырёх к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25» (рис. 4.8, поз. 1), дисковая передающая линия, а также зарядные резисторы (поз. 2), высоковольтный делитель (поз. 3) и трубки (поз. 4) для подачи газа в разрядники образуют выемную часть генератора (рис. Рис. 4.8). Выемная часть помещается в герметичный металлический бак диаметром 570 мм и высотой 385 мм, заполняемый трансформаторным маслом.



*Рис. 4.8. Выемная часть компактного сильноточного наносекундного генератора:  
1 – к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25», 2 – зарядный резистор, 3 – высоковольтный делитель,  
4 – трубки подачи газа*



*Рис. 4.9. Элементы дисковой передающей линии: 1- крышка, 2 – диск, 3- изолятор, 4 – крестовина*



*Рис. 4.10. Фото компактного высоковольтного наносекундного генератора*

Принцип работы генератора следующий. Через один из высоковольтных вводов от высоковольтного источника питания происходит зарядка емкостей к.к.с.  $C_1$  через зарядные резисторы  $R_1 \approx 1$  кОм и катушку индуктивности  $L_1$ , шунтирующую нагрузку (рис. 4.11). К низковольтному плечу  $R_2 = 47$  МОм омического делителя, верхнее плечо которого  $2R_2$  также подключено к источнику питания, подключены управляющие электроды газовых разрядников к.к.с. После зарядки емкостей до заданного уровня напряжения  $U_3$

осуществляется синхронный запуск разрядников путем подачи на их управляющие электроды высоковольтного импульса напряжения обратной полярности  $U_{\text{ПУСК}} = -(2/3 \div 1)U_3$ . В результате срабатывания газовых разрядников происходит параллельное включение четырех емкостей на передающую линию и/или нагрузку.

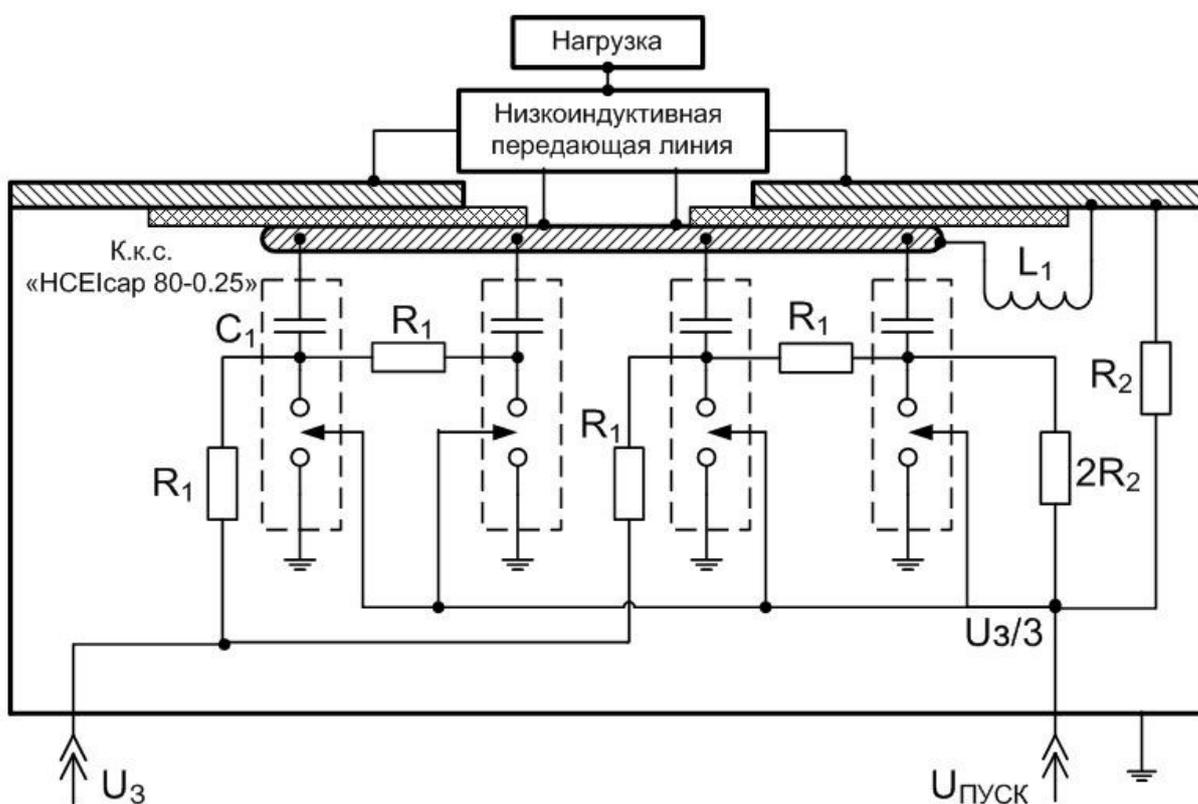


Рис. 4.11. Принципиальная электрическая схема компактного сильноточного наносекундного генератора.

Как показали испытания компактного сильноточного наносекундного генератора в режиме короткого замыкания (при закороченной на выходе дисковой передающей линии), генератор способен обеспечить ток амплитудой около 370 кА при времени нарастания 180 нс до максимума при зарядном напряжении 50 кВ (рис. 4.12). Полученные осциллограммы позволяют оценить параметры разрядного контура генератора:  $C = 1$  мкФ,  $L = 11$  нГн,  $R = 15$  мОм.

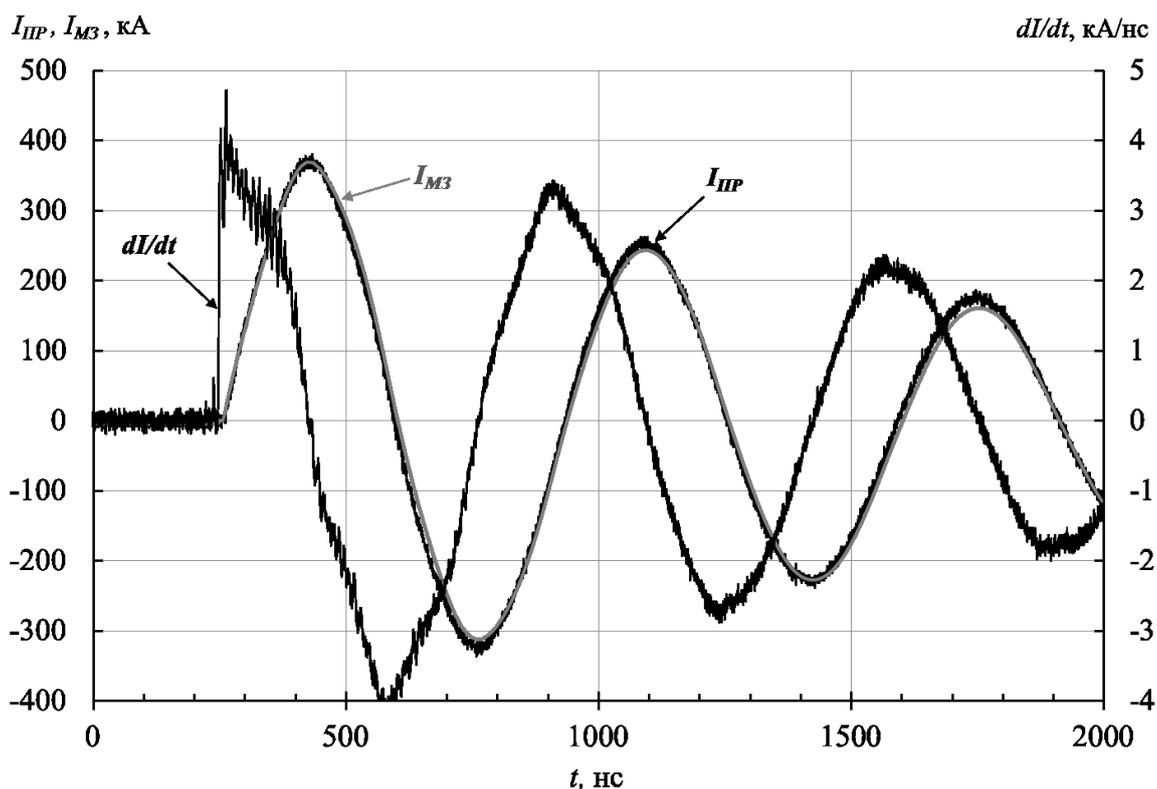


Рис. 4.12. Типичные осциллограммы сигналов с пояса Роговского ( $I_{PP}$ ) и магнитного зонда ( $dI/dt$ ), а также интегрированный сигнал с магнитного зонда ( $I_{M3}$ ), зарегистрированные при работе генератора в режиме короткого замыкания (при зарядном напряжении 50 кВ)

В серии из 600 выстрелов при зарядном напряжении 35, 40 и 45 кВ среднеквадратичное отклонение амплитуды тока от выстрела к выстрелу не превышало 2,5 %, а среднеквадратичное отклонение времени нарастания первой полуволны тока не превышало 1 % при каждом значении зарядного напряжения.

В табл. 4.3 приведены основные технические характеристики генератора.

Таблица 4.3. Технические характеристики компактного сильноточного наносекундного генератора

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

Большая амплитуда и средняя скорость нарастания тока, которые компактный сильноточный наносекундный генератор способен обеспечить в низкоимпедансной нагрузке с высокой стабильностью, а также относительно небольшие массогабаритные характеристики генератора позволяют применять его в качестве драйвера X-пинч нагрузки.

#### *4.3. Компактный импульсный радиограф мягкого рентгеновского диапазона «КИНГ»*

Описанный выше генератор был применен в качестве драйвера X-пинча в составе компактного импульсного радиографа мягкого рентгеновского диапазона «КИНГ» [100]. X-пинч нагрузка, которая устанавливалась непосредственно по центру дисковой передающей линии, представляет собой вакуумный диод, электроды которого перемкнуты несколькими тонкими проводниками, скрещенными в виде X.

Для того чтобы определить реальные параметры разрядного контура генератора тока при работе на нагрузку (диод), были проведены эксперименты с эквивалентом нагрузки с постоянной индуктивностью. Эквивалент нагрузки представлял собой металлический стержень диаметром 6 мм и высотой 11 мм, установленный в диоде вместо провололок. Испытания проводились при сниженном уровне зарядного напряжения 26 кВ, поскольку в колебательном

режиме (без поглощающей энергию нагрузки) увеличивается энерговыделение в конденсаторах и снижается их ресурс работы.

На рис. 4.13 приведены осциллограммы тока генератора, зарегистрированные с помощью пояса Роговского  $I_{\text{пояс}}$ , производной тока, измеренной с помощью магнитного зонда  $dI/dt$ , и импульса тока, полученного интегрированием осциллограммы производной тока  $I_{\text{зонд}}$ . Как видно из приведенных осциллограмм, период колебаний  $T = 900$  нс, амплитуда первой полуволны тока  $I_1 = 130$  кА, амплитуда третьей полуволны тока  $I_2 = 80$  кА. Учитывая, что суммарная емкость конденсаторов равна 1 мкФ, получается, что полная индуктивность контура составляет 20 нГн, а полное сопротивление – около 21 мОм. Время нарастания тока по уровню 0,1–0,9 от максимального значения при этом составляет 145 нс. Время нарастания тока до максимума на первой полуволне составляет 240 нс.

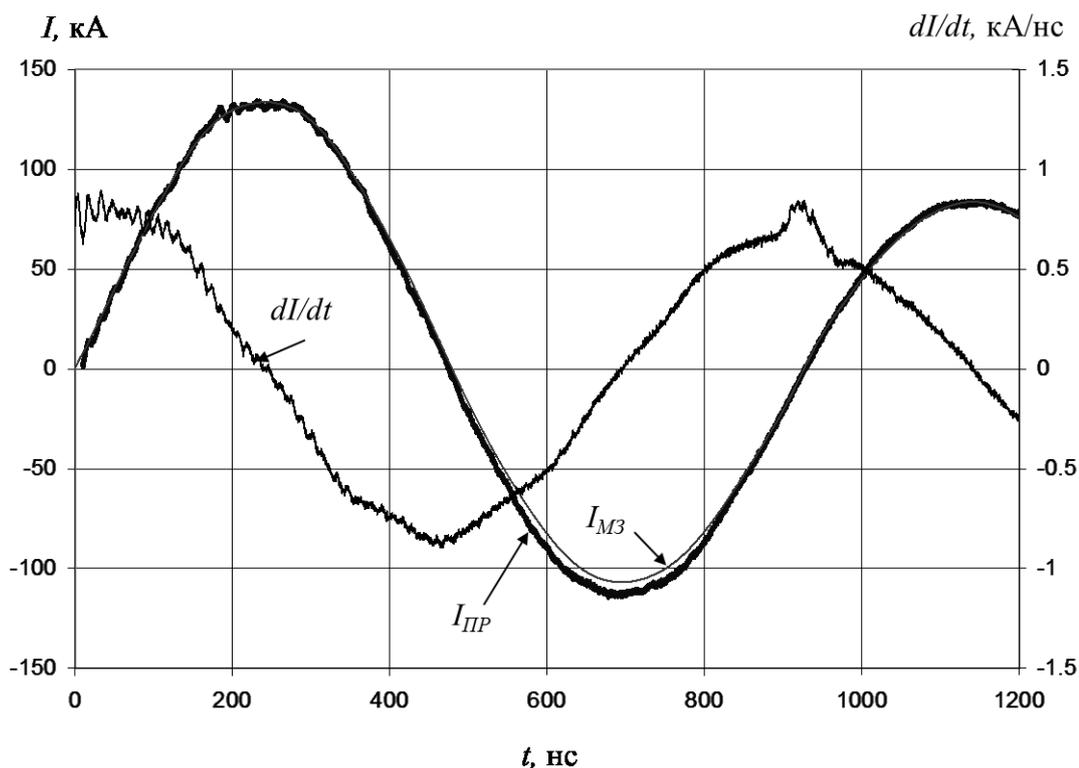


Рис. 4.13. Осциллограммы сигналов с пояса Роговского ( $I_{\text{ПР}}$ ), магнитного зонда ( $dI/dt$ ), а также его интегрированный сигнал ( $I_{\text{МЗ}}$ ), полученные при работе генератора на эквивалент нагрузки

Поскольку испытание генератора при работе на эквивалент нагрузки проводилось при напряжении зарядки, равном 26 кВ, что значительно ниже максимального рабочего напряжения (50 кВ), то, экстраполируя, можно ожидать, что при полном уровне зарядки ток в нагрузке составит около 250 кА при том же времени нарастания порядка 240 нс. Такие параметры достаточны для получения источника мягкого рентгеновского излучения с помощью X-пинч нагрузки, что и было доказано при работе генератора на «реальную» нагрузку [100].

#### *4.4. Компактный импульсный радиограф «СГХ» (Синхронизируемый генератор X-пинча)*

Упомянутый в предыдущем параграфе радиограф «КИНГ», обладая рядом преимуществ (таких как компактность, простота обслуживания и т. п.), имеет один существенный недостаток, а именно исследуемый объект должен располагаться в непосредственной близости от радиографа. В то же время большое число короткоживущих объектов, для исследования которых предназначен радиограф, нельзя расположить/разместить рядом с импульсным генератором. Например, в исследованиях, направленных на изучение свойств экстремальных состояний вещества, для создания короткоживущих объектов используются крупногабаритные установки, мощность которых на несколько порядков выше, чем электрическая мощность радиографа. В этом случае источник сканирующего излучения должен быть вынесен непосредственно к исследуемому объекту. Это реализовано в радиографе «СГХ» [101], аббревиатура которого расшифровывается как «Синхронизируемый генератор X-пинча».

В радиографе «СГХ», так же как и в радиографе «КИНГ», в качестве драйвера X-пинча был использован компактный сильноточный наносекундный генератор, построенный на базе четырёх к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25». Основное отличие заключалось в том, что узел нагрузки (вакуумный диод) подключался к

дисковой передающей линии генератора с помощью дополнительной гибкой низкоиндуктивной передающей линии (НПЛ), изготовленной из 88 кабелей РК-75-3 длиной 1200 мм [101].

Работоспособность низкоиндуктивной передающей линии тестировалась с помощью двух самоинтегрирующих поясов Роговского и магнитного зонда. Один из поясов (ПГ) устанавливался в месте сочленения генератора и НПЛ. Второй пояс (ПН) – в узле нагрузки. Магнитный зонд размещался в отверстии возле основания анода вакуумного диода. Сравнение показаний пояса ПН и показаний магнитного зонда позволяло определять отсутствие пробоев и перекрытий в узле нагрузки. Для абсолютных измерений производной тока интеграл по времени сигнала магнитного зонда нормировался на показания пояса ПН.

На рис. 4.14 показаны типичные осциллограммы (зарядное напряжение 40 кВ), полученные при работе генератора с НПЛ на эквивалент нагрузки, то есть когда X-пинч в узле нагрузки заменялся металлическим цилиндром диаметром 15 мм. Как видно из приведенных осциллограмм, формы импульсов токов генератора  $I_G$  и нагрузки  $I_N$  хорошо совпадают. Амплитуда тока составляет 255 кА при длительности четверти периода 220 нс. Это соответствует индуктивности контура  $\approx 21$  нГн, из которых 11 нГн – индуктивность генератора, 5 нГн – индуктивность узла нагрузки и примерно 5 нГн – индуктивность НПЛ. Наличие небольшой емкости порядка 5 нФ кабелей НПЛ приводит к появлению высокочастотных колебаний на осциллограмме тока с амплитудой  $\approx 5$  % от амплитуды тока. Наиболее отчетливо эти колебания проявляются на осциллограмме производной тока (рис. 4.14). В принципе, влияние таких колебаний на характеристики источника излучения на основе X-пинча может быть негативным, если момент вспышки рентгеновского излучения совпадет с минимумом производной тока.

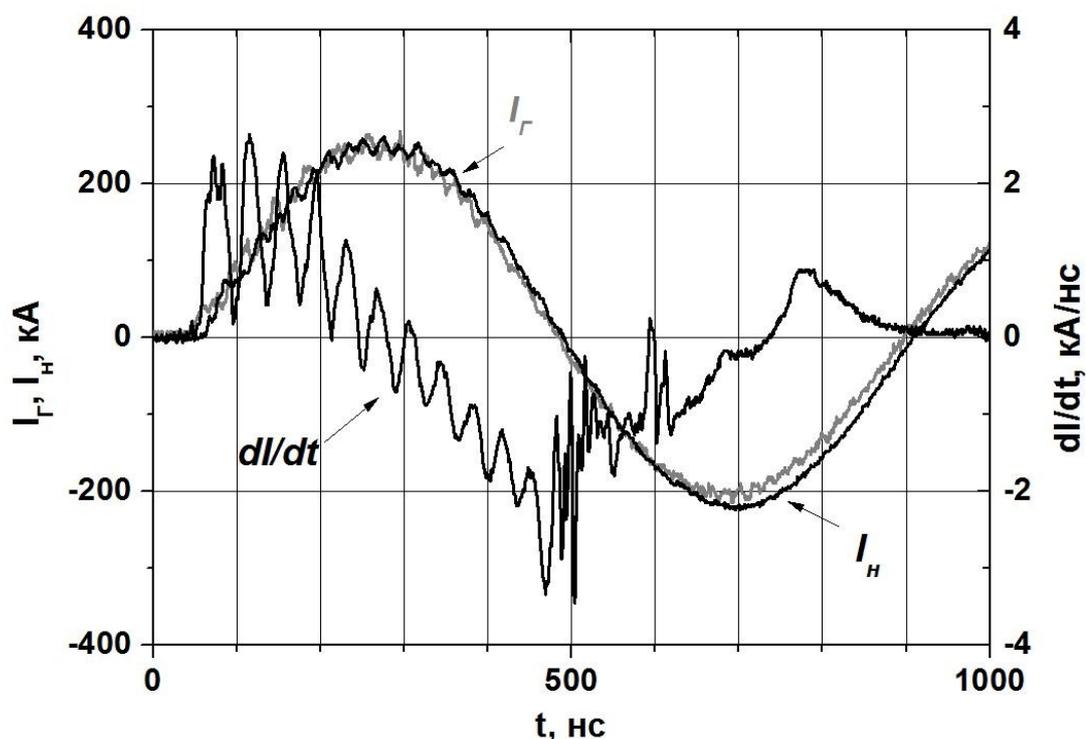


Рис. 4.14. Типичные осциллограммы, полученные при работе генератора с НПЛ на эквивалент нагрузки при зарядном напряжении 40 кВ:  $I_G$  – ток, измеренный поясом Роговского (ПГ) на выходе с генератора;  $I_H$  – ток, измеренный поясом Роговского (ПН) в узле нагрузки;  $dI/dt$  – производная тока, измеренная магнитным зондом в узле нагрузки

Параметры разрядного тока, обеспечиваемые генератором при работе на эквивалент нагрузки, подключенный с помощью НПЛ, позволяют получить источник мягкого рентгеновского излучения с помощью X-пинч нагрузки, что и было доказано при работе генератора на «реальную» нагрузку в составе «СГХ» [101].

### Выводы

1. Разработана конденсаторно-коммутаторная сборка «НСЕІсар 80-0.25», которая в сравнении с другими к.к.с., способными обеспечить на согласованной нагрузке импульс мощности с фронтом 100 нс и менее, имеет наибольшие значения абсолютного и удельного энергозапаса – 800 Дж и  $0,124 \text{ Дж/см}^3$  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.

2. Разработанная к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25» способна при работе на низкоимпедансную нагрузку обеспечивать в ней ток амплитудой до 160 кА при времени нарастания около 150 нс, что позволяет применять сборку для создания компактных сильноточных генераторов тока, построенных на базе нескольких к.к.с.
3. На основе разработанной к.к.с. «НСЕІсар 80-0.25» создан компактный сильноточный наносекундный генератор, который при работе в режиме короткого замыкания способен обеспечить ток амплитудой 370 кА с временем нарастания 180 нс, что позволило применить его в качестве драйвера X-пинч нагрузки в составе радиографов «КИНГ» и «СГХ».

## **Глава 5. ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА БАЗЕ КОНДЕНСАТОРНО-КОММУТАТОРНОЙ СБОРКИ И ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Импульсные источники рентгеновского излучения являются эффективным инструментом для различных исследований, в частности быстропротекающих процессов. Это стимулирует создание надежных малогабаритных рентгеновских аппаратов с различными параметрами. Обычно в высоковольтных импульсных схемах первичный накопитель энергии (генератор Маркса или батарея конденсаторов с импульсным трансформатором) за доли или единицы микросекунд передает энергию в специальный промежуточный элемент, который, в свою очередь, формирует на нагрузке импульс напряжения длительностью единицы – десятки наносекунд [26, 103, 104].

В данной главе описан генератор высоковольтных импульсов на основе малоиндуктивного линейного импульсного трансформатора и к.к.с. «НСЕІсар 50-0.1», совместное применение которых позволяет получать высоковольтный импульс напряжения с фронтом десятки наносекунд непосредственно на нагрузке без промежуточного накопителя энергии [105]. Это позволяет существенно упростить электрическую схему генератора и уменьшить его габаритные размеры. Кроме того, размеры самого линейного импульсного трансформатора значительно уменьшаются при переходе от времен разряда в сотни наносекунд к десяткам наносекунд благодаря повышению импульсной электрической прочности изоляции и пропорциональному времени разряда, уменьшению размера и массы ферромагнитной системы.

### *5.1. Конструкция генератора*

Конструкция генератора высоковольтных импульсов схематично изображена на рис. 5.1. 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:  $C_{уд} = (0,1 \text{ мкФ} \times 4) / 16^2 = 0,00156 \text{ мкФ}$ , или 1,56 нФ. Ударная индуктивность импульсного трансформатора, с учетом индуктивности конденсаторов, подводящих кабелей и первичных витков, вторичного витка и нагрузки составляет 2,8 мкГн. Такие параметры при зарядном напряжении конденсаторов 45 кВ обеспечивают формирование на нагрузке л.и.т. (ускорительной трубке с вакуумным электронным диодом с импедансом ~300 Ом) высоковольтного импульса с амплитудой 750 кВ, передним фронтом 40 нс и длительностью ~70 нс на полувысоте. Для лучшего согласования л.и.т. и нагрузки между ними может устанавливаться коаксиальный конденсатор емкостью 1,0–1,2 нФ (на рисунке не показан), заполненный глицерином, что увеличивает передаваемую в электронный диод энергию и длительность высоковольтного импульса в 1,5 раза. Габаритная длина генератора высоковольтных импульсов при этом увеличивается примерно на 300 мм, диаметр конденсатора равен диаметру л.и.т.

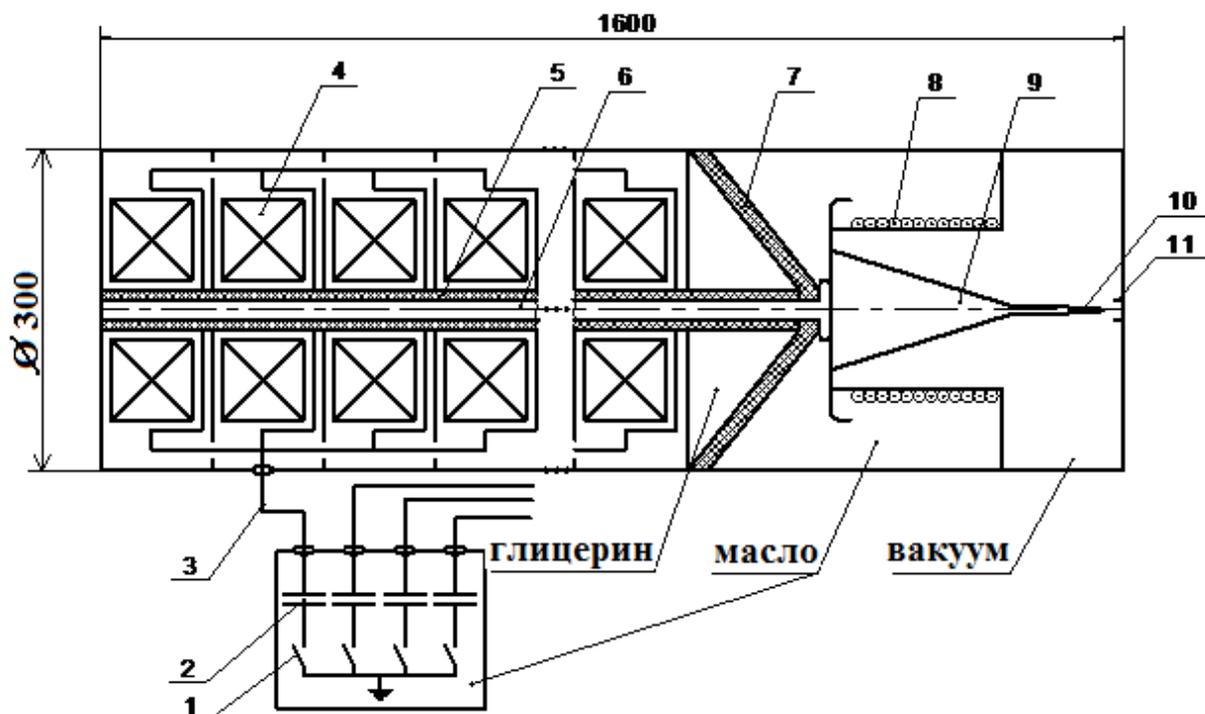


Рис. 5.1. Схематичное изображение конструкции генератора высоковольтных импульсов и узла нагрузки: 1 – коммутатор; 2 – конденсатор; 3 – высоковольтные кабели; 4 – магнитопроводы ступени л.и.т. (всего 16 ступеней); 5 – высоковольтная изоляция вторичного витка; 6 – вторичный виток; 7 – проходной изолятор; 8 – катушка индуктивности; 9 – анододержатель; 10 – анод; 11 – катод

В табл. 5.1 представлены значения напряженности электрического поля в различных элементах генератора.

Таблица 5.1. Воздействующее напряжение и напряженность электрического поля в различных элементах генератора

Элемент конструкции генератора	Напряжение, кВ	Характер воздействующего напряжения	Напряженность электрического поля, кВ/мм
Конденсатор НСЕI сар 50-0.1	47	Постоянное + импульсное	200
Кабели КВИМ	47	Импульсное	18,5
Изоляция первичного витка	47	Импульсное	15,6
Изоляция вторичного витка	720	Импульсное	100
Вакуумная поверхность изолятора трубки	720	Импульсное	3

На рис. 5.2, а показано устройство конденсаторно-коммутаторной сборки «НСЕIсар 50-0.1» с основными элементами конструкции, специально разработанной ранее для данной задачи [106]. Конденсаторно-коммутаторная сборка состоит из конденсатора емкостью 0,1 мкФ с максимальным рабочим напряжением 50 кВ и коммутатора – газового искрового разрядника. Объем активной части конденсатора сборки «НСЕIсар 50-0.1» составляет 0,6 дм<sup>3</sup>. Разрядник – трёхэлектродный, управляемый по принципу искажения поля. Амплитуда запускающего импульса такая же, как и зарядное напряжение конденсатора, с фронтом после обостряющего промежутка не более 10 нс. Промежуток между основными электродами разрядника составляет 5 мм, давление газа в коммутаторе 4,5 ати. В качестве газа применяется сухой атмосферный воздух с точкой росы –30 °С. Четыре сборки «НСЕIсар 50-0.1» смонтированы на одной металлической крышке и помещены в один корпус. Общий вид смонтированныхборок приведен на рис. 5.2, б.

Испытания, проведенные ранее, показали, что одна сборка «НСЕIсар 50-0.1» имеет общую индуктивность 16 нГн и при зарядном напряжении конденсатора 45 кВ в режиме короткого замыкания развивает ток 100 кА при времени нарастания 50 нс [106]. Полный вес конденсаторно-коммутаторной сборки – 3,5 кг.

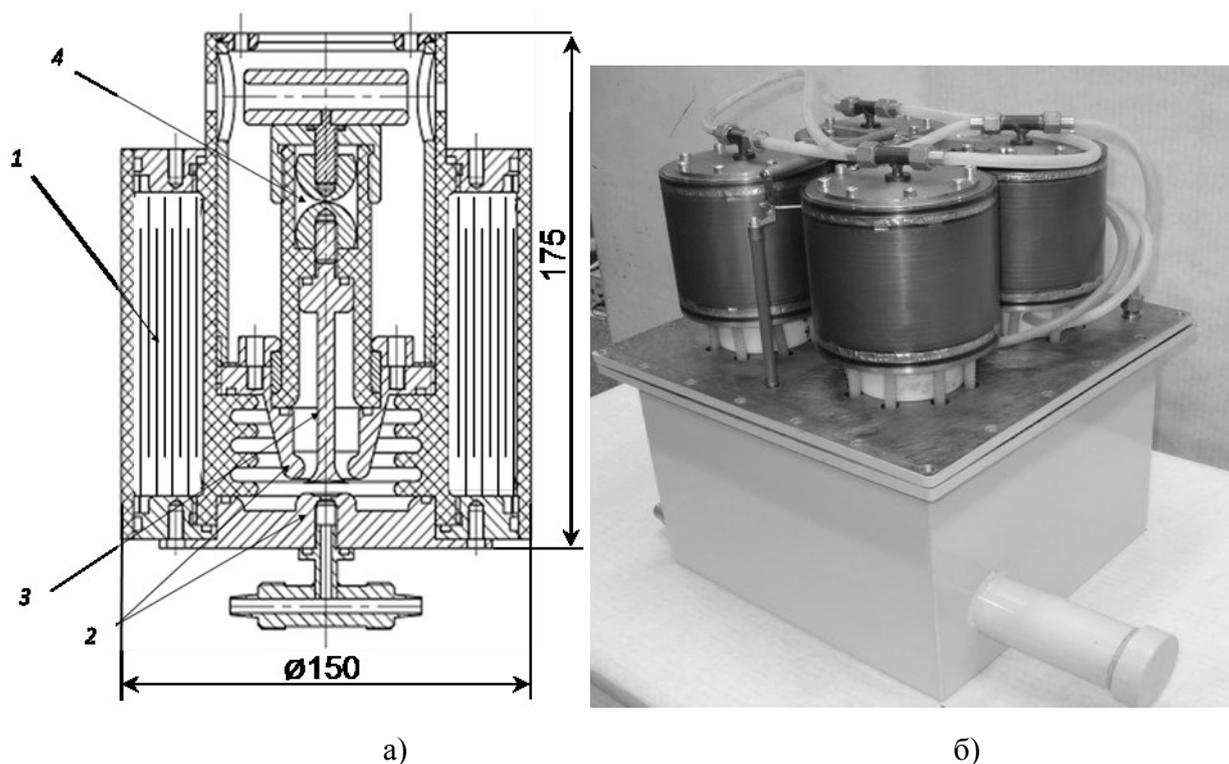


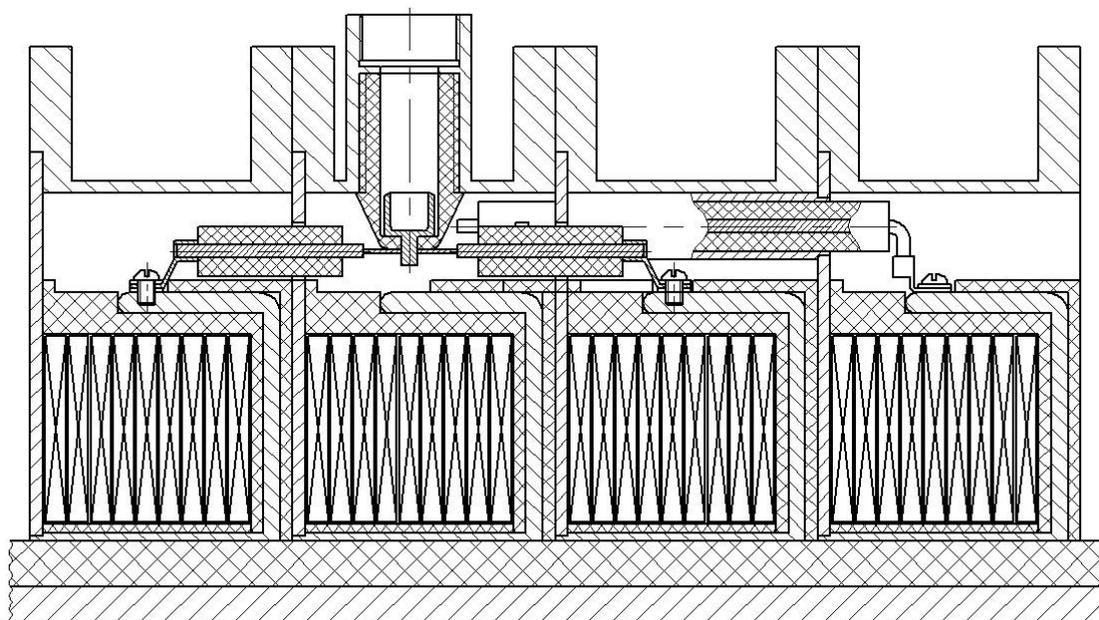
Рис. 5.2. К.к.с. «HCEIcar 50-0.1» в разрезе (а): 1 – конденсатор; 2 – основные электроды разрядника; 3 – управляющий электрод разрядника; 4 – обостряющий промежуток; батарея из 4-х к.к.с. «HCEIcar 50-0.1», смонтированных на металлической крышке (б)

Индуктивность разрядного контура каждой из четырех сборок составляет около 34 нГн, из которых 16 нГн – индуктивность самой сборки, а 18 нГн – индуктивность шести высоковольтных кабелей «КВИМ» длиной 1 м, подключенных параллельно к одной секции линейного импульсного трансформатора.

Линейный импульсный трансформатор состоит из четырех одинаковых секций, каждая из которых, в свою очередь, состоит из четырех ступеней (см. рис. 5.3). К каждой секции через высоковольтные вводы подключаются шесть параллельных кабелей от одной конденсаторно-коммутаторной сборки. Все четыре ступени одной секции подключены к высоковольтным вводам л.и.т. с помощью отрезков проводников, расположенных внутри корпусов его ступеней.



а)



б)

*Рис. 5.3. 3D-эскиз одной секции л.и.т., изображенной с местным разрезом (а), и продольный разрез секции (б) для демонстрации схемы подключения ступеней секции к одному из шести высоковольтных выводов*

Конструкция одной ступени л.и.т. и внешний вид л.и.т. и ускорительной трубки показаны на рис. 5.4.

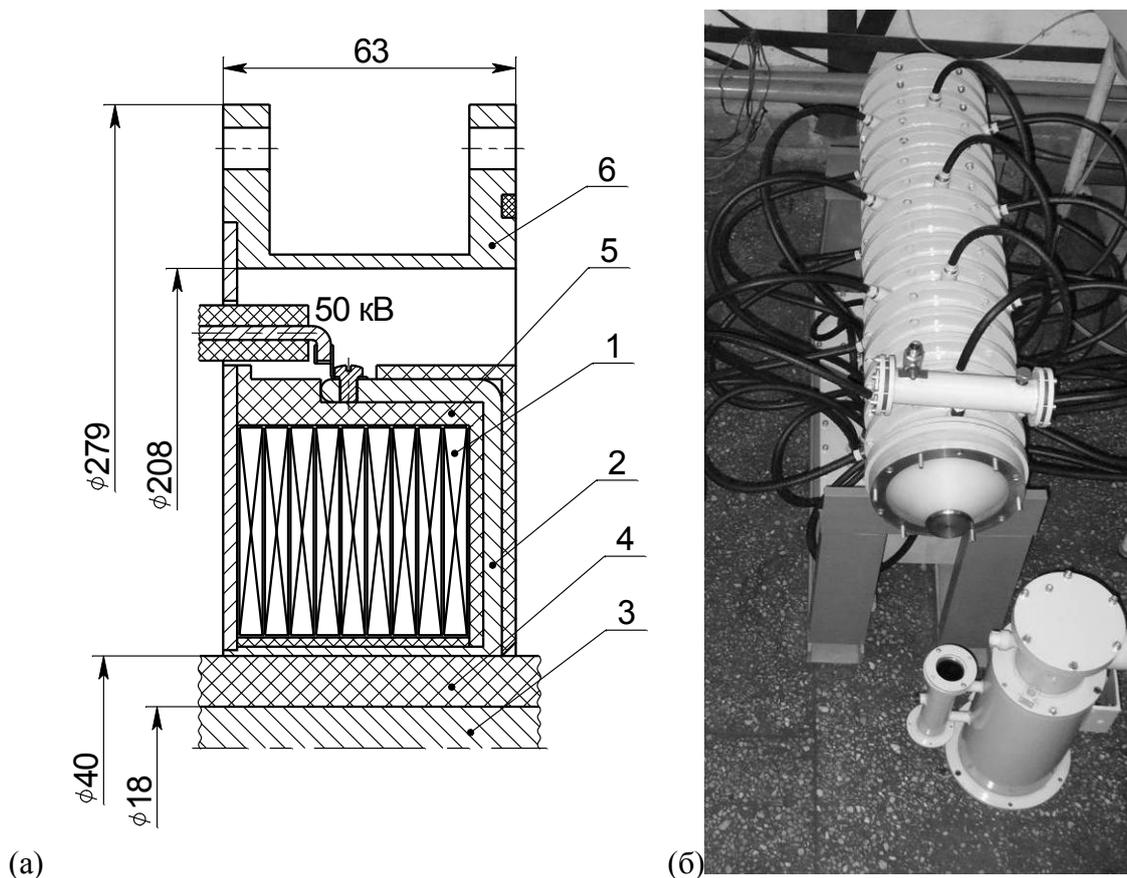


Рис. 5.4. Конструкция секции л.и.т. (а) (1 – магнитопровод; 2 – объемный первичный виток; 3 – вторичный виток; 4 – глицерино-пленочная изоляция; 5 – полиэтиленовый корпус; 6 – корпус); внешний вид л.и.т. и ускорительной трубки (б)

Объемный первичный виток (поз. 2) охватывает магнитопровод (поз. 1). Каждый магнитопровод изготовлен из девяти сердечников с размерами  $\varnothing 48,5 \times \varnothing 138 \times 5$  мм, упакованных в общий полиэтиленовый корпус (поз. 5). Каждый сердечник при этом помещен в футляр из полипропилена толщиной 200 мкм. Изоляция магнитопровода от первичного витка рассчитана на импульсное напряжение 50 кВ. Сердечники изготовлены на ОАО «Ашинский металлургический завод» из аморфного сплава (ленты толщиной 30 мкм) 2НСР (аналог Metglas 2605 S2) [107, 108]. При напряжении на первичном витке 50 кВ напряжение между смежными слоями ленты в сердечнике составляет 3,7 В. Общее сечение магнитопровода из девяти сердечников при коэффициенте заполнения 0,8 составляет:  $S = 2,24 \times 9 \times 0,8 = 16,1 \text{ см}^2$ . По центру всех 16-ти ступеней проходит общий вторичный виток (поз. 3), который представляет

собой металлический стержень  $\varnothing 18$  мм с намотанной на него глицирино- пленочной изоляцией (поз. 4). Рабочая напряженность данной изоляции составляет 1 МВ/см. Аналогичная изоляция используется в генераторе МИГ [109].

Высоковольтный конец вторичного витка закреплен в выходном полиэтиленовом изоляторе, отделяющем л.и.т. от ускорительной трубки. Корпусы секций л.и.т., соединенные друг с другом, с торцевым фланцем и с выходным изолятором, образуют герметичный корпус. Корпус л.и.т., общая длина которого составляет  $\sim 1,2$  м, заполняется глицерином, объем которого не превышает 20 л.

Генератор был испытан при работе на эквивалент нагрузки, в качестве которой использовался жидкостный омический делитель, выполняющий также функции датчика напряжения. Сопротивление эквивалента нагрузки составляет 250 Ом. Типичные осциллограммы, полученные при работе на эквивалент нагрузки, представлены на рис. 5.5.

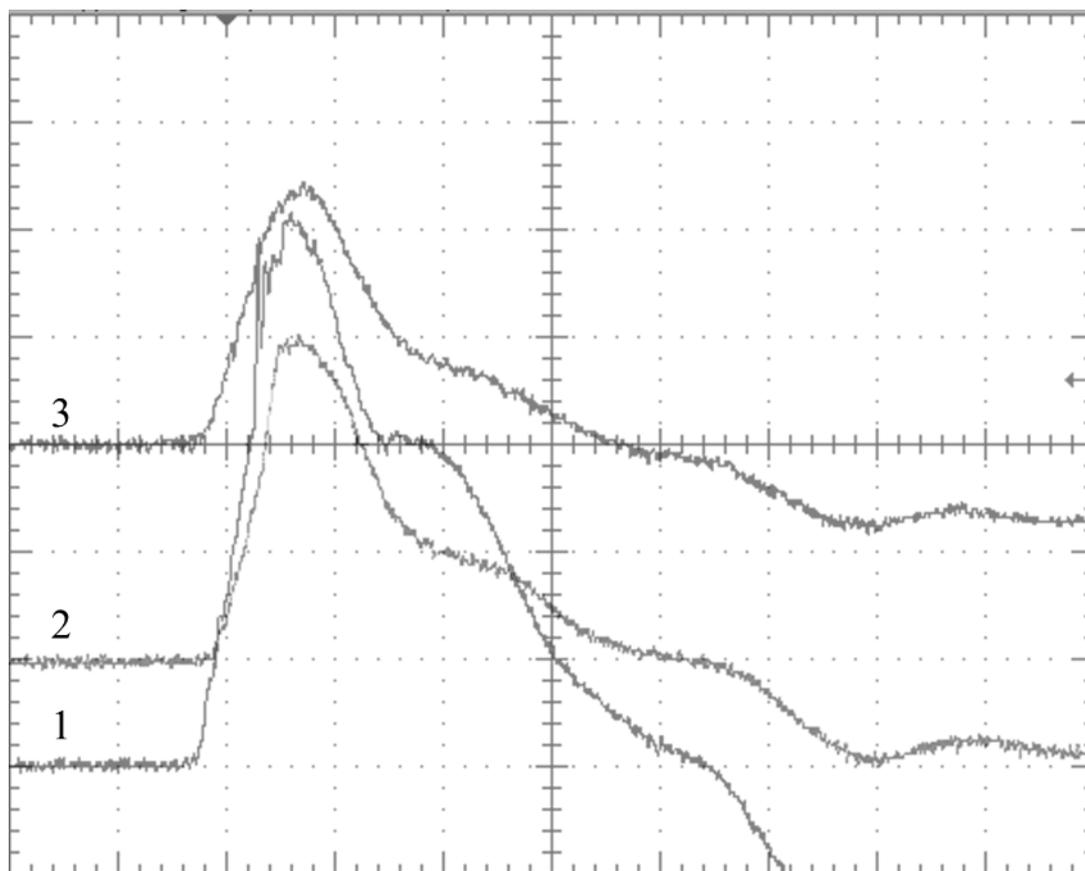
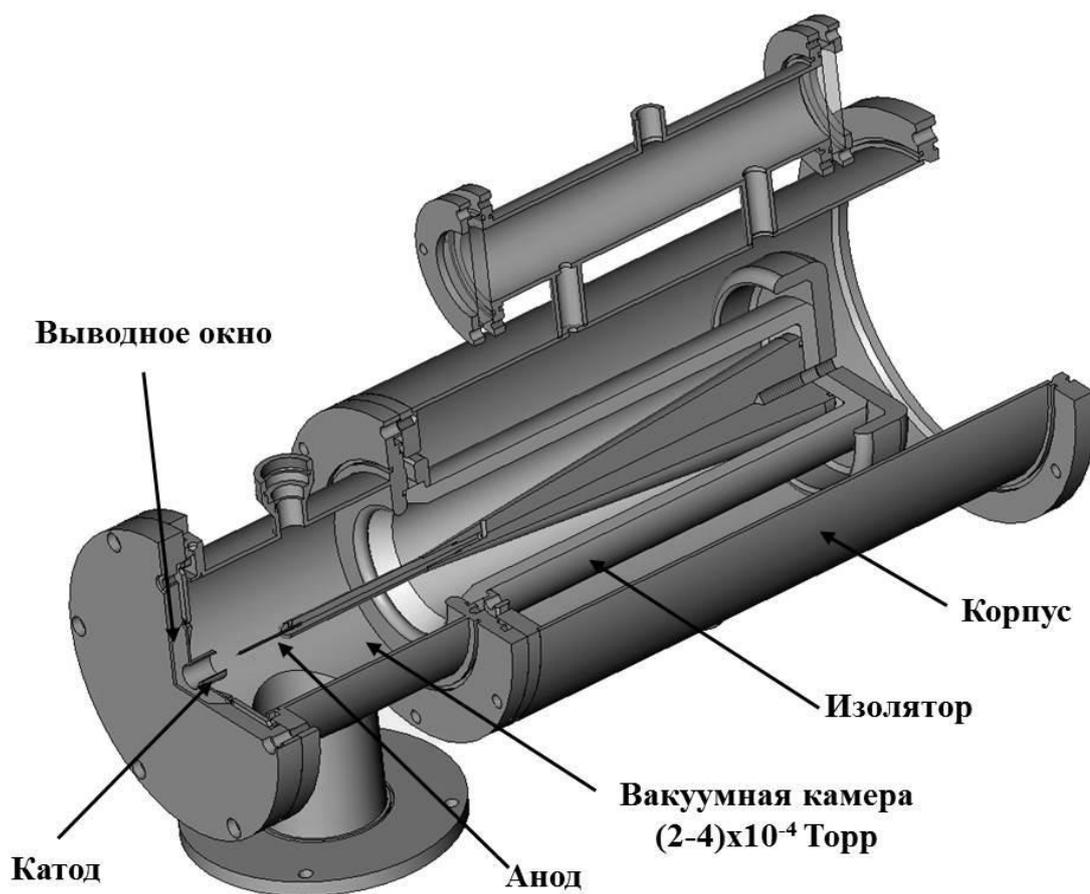


Рис. 5.5. Осциллограммы тока в эквиваленте нагрузки (1), напряжений с омического (2) и емкостного (3) делителей напряжения. Масштабы: по вертикали – 540 А/деление (1), 213 кВ/деление (2), 270 кВ/деление (3); по горизонтали – 80 нс/деление

## 5.2. Генерация рентгеновского излучения

В качестве нагрузки генератора высоковольтных импульсов использовалась ускорительная трубка с вакуумным электронным диодом (рис. 5.6). Ускорительная трубка состоит из корпуса, полиэтиленового вакуумного изолятора и вакуумного электронного диода. Пространство между вакуумным изолятором и корпусом трубки заполняется трансформаторным маслом. Электронный диод образован «заземлённым» катодом и находящимся под положительным потенциалом анодом.



*Рис. 5.6. Ускорительная трубка*

В качестве катода в данном диоде использовались тонкостенные стальные трубки различного диаметра с заостренной кромкой для улучшения электронной эмиссии. В качестве анода использовался 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 мм, толщина стенки катода – 0,5 мм и расстояние между плоскостью эмитирующей кромки и анодом – 9–12 мм.

При торможении пучка электронов в вольфрамовом аноде создавался источник рентгеновского излучения, предназначенный для радиографии с высоким пространственным разрешением.

В выходной дюралюминиевой крышке вакуумной камеры было проточено окно толщиной ~400 мкм для вывода излучения в атмосферу. Для

замыкания цепи перемагничивания линейного импульсного трансформатора по вторичному витку, а также для улучшения распределения электрического поля в области вакуумного изолятора на изолятор вдоль всей его поверхности была намотана токопроводящая катушка (см. рис. 5.1) с индуктивностью 140 мкГн. Вакуум в диоде откачивался паромасляным насосом АВП-100 до давления  $(2-4) \times 10^{-4}$  Торр.

Напряжение на ускорительной трубке измерялось с помощью емкостного делителя, ток в нагрузке – поясами Роговского, а временная зависимость мощности излучения – полупроводниковым детектором СКД1-01. Измерение доз рентгеновского излучения проводилось термолюминисцентными 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.

Всего было проведено более 200 пусков установки. Напряжение на нагрузке достигало 750 кВ, ток в нагрузке – 2–3,5 кА, импеданс диода – 250–300 Ом. В экспериментах без коаксиального конденсатора между линейным импульсным трансформатором и ускорительной трубкой доза на выводном окне (44 мм от анода) составила 5 Рентген, длительность рентгеновского импульса на полувысоте – 40 нс. В экспериментах с коаксиальным конденсатором емкостью 1,0–1,2 нФ между линейным импульсным трансформатором и ускорительной трубкой доза на выводном окне составила 8 Рентген, длительность рентгеновского импульса на полувысоте – 60 нс. Типичные осциллограммы, полученные в ходе экспериментов на генераторе рентгеновских импульсов без коаксиального конденсатора, представлены на рис. Рис. 5.75.7.

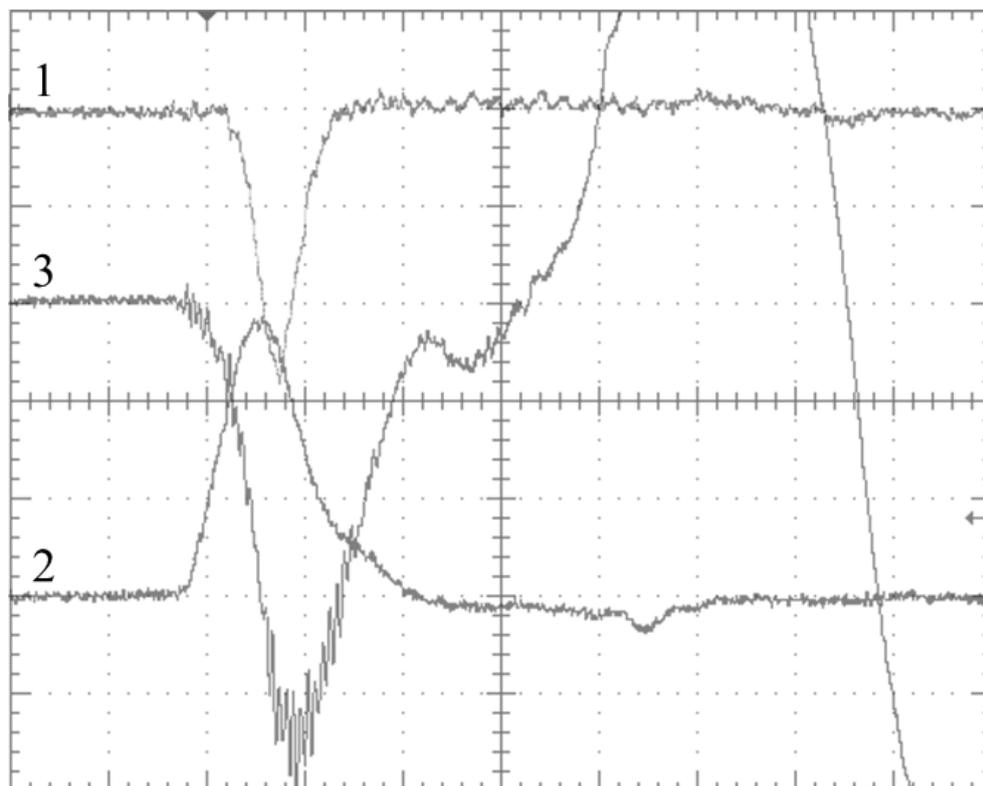
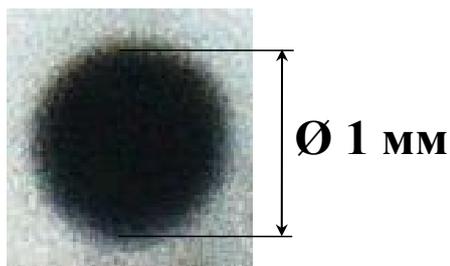


Рис. 5.7. Оциллограммы: 1 – импульса мощности излучения (СКД1-01, в отн. ед.), 2 – напряжения на нагрузке, 3 – тока в нагрузке. Масштабы: по вертикали – 270 кВ/деление (2), 540 А/деление (3); по горизонтали – 80 нс/деление.

На рис. 5.8 представлено изображение источника излучения на рентгеновской фотопленке, полученное с помощью камеры-обскуры.

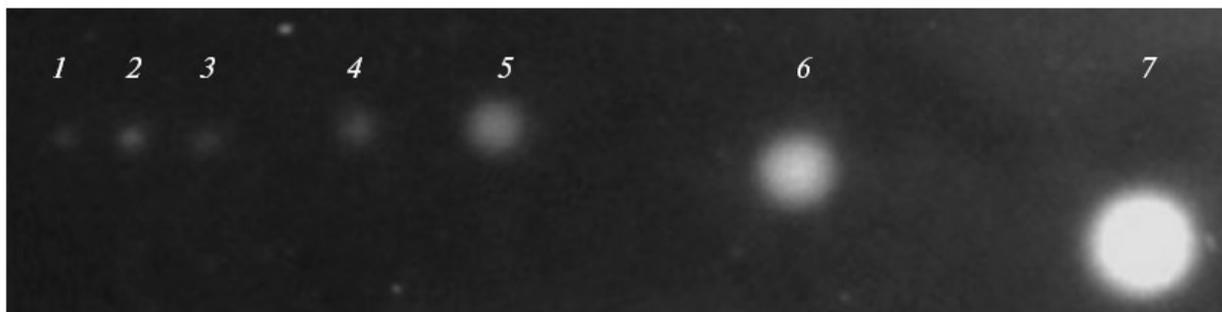
Измеренный размер источника излучения составил  $< 2$  мм. Пересчет доз в предположении точечного источника излучения показал, что на расстоянии 1 м от анода экспозиционная доза составит 10 мР в экспериментах без коаксиального конденсатора между линейным импульсным трансформатором и ускорительной трубкой и 15 мР в экспериментах с коаксиальным конденсатором.

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.



*Рис. 5.8. Изображение источника излучения на рентгеновской фотопленке*

На расстоянии 1 м от анода устанавливался стальной клин со ступеньками шириной 2 мм и высотой 1 мм, при этом толщина клина изменялось от 5 до 15 мм. Дополнительно рядом с клином устанавливались металлические (свинец, сталь, медь) предметы малого размера для определения разрешающей способности установки. На расстоянии 0,3 м за клином (1,3 м от источника) устанавливалась кассета с рентгеновской пленкой (РФ-3, AGFA) и усиливающими экранами. На пленке РФ-3 был получен снимок клина, на котором различимы ступеньки, при этом доза в эксперименте в одном метре от диода составила 6 мР. На рис. 5.9 приведены рентгеновские фотографии стальных шариков диаметрами от 0,5 до 4,0 мм.



*Рис. 5.9. Рентгеновская фотография стальных шариков диаметрами 0,5 (1), 0,8 (2), 1,0 (3), 1,4 (4), 2,0 (5), 2,8 (6), 4,0 мм (7)*

Высокую разрешающую способность установки подтверждает факт присутствия на пленке изображения стального шарика диаметром 0,5 мм, располагавшегося в 30 см от пленки и в 1 м от источника излучения.

Также проводилось определение эффективной энергии квантов. Для этого за выводным окном генератора устанавливалась стальная пластина толщиной

5 мм. С каждой стороны пластины измерялись дозы излучения с помощью термолюминесцентных детекторов LiF. Пластина ослабила интенсивность излучения в 2,65 раза при максимальном напряжении на ускорительной трубке 750 кВ. Используя обычную формулу для ослабления излучения за барьером:

$$I = I_0 \times e^{(-\mu \times x)},$$

находим коэффициент ослабления излучения материалом барьера  $\mu$ , на основании которого по таблицам ослабления находим эффективную энергию излучения. При максимальном напряжении на ускорительной трубке 750 кВ эффективная энергия излучения составила  $\sim 125$  кэВ.

Основные параметры малогабаритного источника жесткого рентгеновского излучения представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Параметры малогабаритного источника жесткого рентгеновского излучения

Напряжение на ускорительной трубке	до 750 кВ
Эффективная энергия квантов	125 кэВ
Размер излучающего пятна	<2 мм
Длительность рентгеновского импульса на полувысоте:	40 нс 60* нс
Доза на расстоянии 1 м от анода	10 мР 15*мР

\* – в случае использования промежуточной глицериновой емкости.

### Вывод

На основе линейного импульсного трансформатора и к.к.с. «НСЕІсар 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 полувысоте около 70 нс. Генератор используется в составе малогабаритного источника жесткого рентгеновского излучения (энергия квантов  $\sim 125$  кэВ) с размером излучающей области менее 2 мм и длительностью рентгеновского импульса 40 нс на полувысоте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие **основные результаты**:

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 «НСЕІсар 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 «НСЕІсар 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 «НСЕІсар 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/см<sup>3</sup> 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. «НСЕІсар 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. «НСЕІсар 80-0.25» создан компактный сильноточный наносекундный генератор, который при работе в режиме короткого замыкания способен обеспечить ток с амплитудой 370 кА и временем нарастания 180 нс, что позволило применить его в качестве драйвера нагрузки типа «Х-пинч» в составе радиографов «КИНГ» и «СГХ».
7. На основе линейного импульсного трансформатора и к.к.с. «НСЕІсар 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 полувысоте около 70 нс. Генератор используется в составе малогабаритного источника жесткого рентгеновского излучения (энергия квантов  $\sim 125$  кэВ) с размером излучающей области менее 2 мм и длительностью рентгеновского импульса 40 нс на полувысоте.

В результатах, представленных в диссертационной работе, автором внесен основной 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 опубликованных по теме диссертации работах.

Автором лично получены все результаты диссертационной работы, составляющие научную новизну и выносимые на защиту.

Полученные результаты, научные положения и выводы диссертационной работы, связанные с разработкой элементов конструкции компактных сильноточных импульсных генераторов, могут быть в совокупности квалифицированы как существенный вклад в развитие высоковольтной импульсной техники.

Считаю своим приятным долгом поблагодарить Н.А. Ратахина, В.Ф. Федущака, С.А. Чайковского, В.К. Петина, В.И. Орешкина и всех коллег-соавторов за многолетнее плодотворное сотрудничество.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц, Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов / Г.А. Месяц. – М.: Сов. радио, 1974. – 256 с.
2. Месяц, Г.А. Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Месяц. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
3. Курчатов, И.В. О возможности создания термоядерных реакторов в газовом разряде / И.В. Курчатов // Атомная энергия. – 1956. – Т. 5. – С. 65–75.
4. Ryutov, D.D. The physics of fast Z-pinches / D.D. Ryutov, M.S. Derzon, M.K. Matzen // Rev. Modern Phys, 2000. – V. 72. – No. 1. – P. 167.
5. Бакулин, Ю.Д. Расчёт сжатия ДТ-смеси электрически взрывающейся цилиндрической оболочкой / Ю.Д. Бакулин, А.В. Лучинский, В.И. Афонин // Прикладная механика и техническая физика. – 1980. – Т. 6. – С. 7–10.
6. Алиханов, С.Г. Применение техники РЭП для разгона цилиндрических лайнеров давлением магнитного поля / С.Г. Алиханов, Л.И. Рудаков, В.П. Смирнов, И.Р. Ямпольский // Письма в Журн. эксп. теорет. физики. – 1979. – Т. 5. – Вып. 22. – С. 1395.
7. Бакулин, Ю.Д. Расчёт сжатия газов при электрическом взрыве цилиндрических оболочек / Ю.Д. Бакулин, В.В. Лоскутов, А.В. Лучинский // Известия высших учебных заведений. Физика, 1979. – № 12. – С. 469.
8. Бакшт, Р.Б. Экспериментальное исследование многопроволочных цилиндрических оболочек на установке СНОП-2 / Р.Б. Бакшт, И.М. Дацко, Н.Ф. Ковшаров, А.В. Лучинский, Г.А. Месяц, Н.А. Ратахин, С.А. Сорокин, В.П. Стасьев, В.Ф. Федущак // Письма в Журн. техн. физики. – 1983. – Т. 9. – Вып. 19. – С. 1192–1196.
9. Петин, В.К. Мощные кольцевые электронные пучки как источники рентгеновского излучения для однородной засветки объектов большой

- площади / В.К. Петин, Н.А. Ратахин, В.Ф. Федущак // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1995. – Т. 38. – Вып.12. – С.40–44.
10. 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.
  11. Басов, Н.Г. Физика лазерного термоядерного синтеза / Н.Г. Басов, И.Г. Лебо, В.Б. Розанов – М.: Знание, 1988. – 174 с.
  12. Ушаков, В.Я. История и современные проблемы электроэнергетики и высоковольтной электрофизики. / В.Я. Ушаков: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 219 с.
  13. World Energy Council. World Energy Resources 2013 [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete\\_WER\\_2013\\_Survey.pdf](http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf) (дата обращения: 03.09.2015)
  14. Гончаров, Г.А. К истории исследований по управляемому термоядерному синтезу / Г.А. Гончаров // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171. – № 8. – С. 902–904.
  15. Бойко, В.И. Управляемый термоядерный синтез и проблемы инерциального термоядерного синтеза / В.И. Бойко // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 6. – С. 97–104.
  16. Smirnov, V.P. Fast liners for inertial fusion / V.P. Smirnov // Plasma Phys. Controlled Fusion. – 1991. – V. 33. – № 13. – P. 1697–1714.
  17. Смирнов, В.П. Увеличение интенсивности излучения в квазисферической системе «двойной лайнер» /dynamic-hohlraum/ В.П. Смирнов, С.В. Захаров, Е.В. Грабовский // Письма в Журн. эксп. теорет. физики. – 2005. – Т. 81. – Вып. 9. – С. 556–562
  18. Кучинский, Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы / Г.С. Кучинский – Л.: Энергия, 1973. – 176 с.

19. Miller, A.R. Power flow enhancement in the Blackjack 5 pulser / A.R. Miller // Digest of Technical Papers of the Fourth IEEE Pulsed Power Conference. – Albuquerque, New Mexico, 1983. – P. 594.
20. Martin, T.H. Proto II – A short Pulse Water Insulated Accelerator / T.H. Martin, J.P. VanDevender, D.L. Johnson, D.H. McDaniel, M. Aker // Proceedings of the 1st International Topical Conf. on Electron Beam Research and Technology. – Albuquerque, New Mexico, 1976. – V. 1. – P. 450.
21. Bloomquist, D.D. Saturn: A large area x-ray simulation accelerator / D.D. Bloomquist, R.W. Stinnett, D.H. McDaniel, J.R. Lee, A.W. Sharpe, J.A. Halbleib, L.G. Schlitt, P.W. Spence, P. Corcoran // Proceedings of the 6th IEEE International Pulsed Power Conference. – Arlington, VA, 1987. – V.1. – P. 310–317.
22. Martin, T. H. Particle Beam Fusion Accelerator-I (PBFA-I) / T.H. Martin, J.P. VanDevender, G.W. Barr, S.A. Goldstein, R.A. White, J.F. Seamen // IEEE Transaction on Nuclear Science. – 1981. – V. 28. – Iss. 3. – P. 3365–3369.
23. Spielman, R.B. Pulsed power performance of PBFA-Z / R.B. Spielman, W.A. Stygar, J.F. Seamen, F. Long, H. Ives, R. Garcia, T. Wagoner, R.W. Struve, M. Mostrom, I. Smith, D. Spence, P. Corcoran // Digest of Technical Papers on the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. – Baltimore, MD, 1997. – V. 1. – P. 709–714.
24. Savage, M.E. An overview of pulse compression and power flow in the upgraded Z pulsed power driver / M.E. Savage, L.F. Bennett, D.E. Bliss, W.T. Clark, R.S. Coats, J.M. Elizondo, K.R. LeChien, H.C. Harjes, J. M. Lehr, J.E. Maenchen, D.H. McDaniel, M.F. Pasik, T.D. Pointon, A.C. Owen, D.B. Seidel, D.L. Smith, B.S. Stoltzfus, K.W. Struve, W.A. Stygar, L.K. Warne, J.R. Woodworth // Proceedings of the 16th IEEE Pulsed Power Conference. – Albuquerque, NM, 2007. – V. 2. – P. 979–984.
25. Альби́ков, З.А. Импульсный термоядерный комплекс «Ангара-5-1» / З.А. Альби́ков, Е.П. Велихов, А.И. Веретенников, В.А. Глухих,

- Е.В. Грабовский, Г.М. Грязнов, О.А. Гусев, Г.Н. Жемчужников, В.И. Зайцев, О.А. Золотовский, Ю.А. Истомин, О.В. Козлов, И.С. Крашенинников, С.С. Курочкин, Г.М. Латманизова, В.В. Матвеев, Г.В. Минеев, В.Н. Михайлов, С.Л. Недосеев, Г.М. Олейник, В.П. Певчев, А.С. Перлин, О.П. Печерский, В.Д. Письменный, Л.И. Рудаков, В.П. Смирнов, В.Я. Царфин, И.Р. Ямпольский // Атомная энергия. – 1990. – Т. 68. – Вып. 1. – С. 26–35.
26. Лучинский, А.В. Многоцелевой импульсный генератор трансформаторного типа / А.В. Лучинский, Н.А. Ратахин, В.Ф. Федущак, А.Н. Шепелев // Известия высших учебных заведений. Физика, 1997. – № 12. – С. 67–75.
27. Kovalchuk, B.M. High current pulsed power generator GIT-16 / B.M. Kovalchuk, S.P. Bugaev, A.M. Volkov, A.A. Kim, V.N. Kiselev, N.F. Kovsharov, V.A. Kokshenev, G.A. Mesyats, A.P. Khuzeev // Proc. IXth Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. – Washington, 1992. – V. 1. – P. 394–402.
28. Grabovski, E.V. Wire array investigation on Angara-5–1 and Baikal project / E.V. Grabovski, V.V. Aleksandrov, A.N. Gritsuk, K.N. Mitrofanov, G.M. Oleinik, V.I. Zaitsev, G.S. Volkov, A.P. Lototsky, A.N. Gribov, V.A. Gasilov, O.G. Olkhovskaya, P.V. Sasorov, V.I. Engelko, A.P. Shevelko // Book of Abstracts of IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conf. – San Francisco, CA, 2013. – P. 224.
29. Kim, A.A. 100 ns current rise time LTD stage / A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, A.N. Batrikov, V.G. Durakov, S.N. Volkov, V.A. Sinebryukhov // Proceedings of 13th IEEE Pulsed Power Conference. – 2001. – V. 2. – P. 1491–1494.
30. Kim, A.A. 100 GW fast LTD stage / A.A. Kim, A.N. Batrikov, S.N. Volkov, V.G. Durakov, B.M. Kovalchuk, V.A. Sinebryukhov // Proceedings of the 13th International Symposium on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 2004. – P. 141–144.

31. Kim, A.A. Development and tests of fast 1-MA linear transformer driver stages / A.A. Kim, M.G. Mazarakis, V.A. Sinebryukhov, B.M. Kovalchuk, V.A. Visir, S.N. Volkov, F. Bayol, A.N. Bostrikov, V.G. Durakov, S.V. Frolov, V.M. Alexeenko, D.H. McDaniel, W.E. Fowler, K. LeChien, C. Olson, W.A. Stygar, K.W. Struve, J. Porter, R.M. Gilgenbach // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2009. – V. 12. – Iss. 5. – 050402. – DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.12.050402.
32. Mazarakis, M.G. High current, 0.5-MA, fast, 100-ns, linear transformer driver experiments / M.G. Mazarakis, W.E. Fowler, A.A. Kim, V.A. Sinebryukhov, S.T. Rogowski, R.A. Sharpe, D.H. McDaniel, C.L. Olson, J.L. Porter, K.W. Struve, W.A. Stygar, J.R. Woodworth // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2009. – V. 12. – Iss. 5. – 050401. – DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.12.050401.
33. Woodworth, J.R. Compact 810 kA linear transformer driver cavity / J.R. Woodworth, W.E. Fowler, B.S. Stoltzfus, W.A. Stygar, M.E. Sceiford, M.G. Mazarakis, H.D. Anderson, M.J. Harden, J.R. Blickem, R. White, A.A. Kim // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2011. – V. 14. – Iss. 4. – 059901. – DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.14.040401.
34. Kim, A.A. 1 MV ultra-fast LTD generator / A.A. Kim, A.N. Bostrikov, S.N. Volkov, V.G. Durakov, B.M. Kovalchuk, V.A. Sinebryukhov // *Proceedings of 14th IEEE Pulsed Power Conference*. – Dallas, TX, 2003. – V. 2 – P. 853–854.
35. LeChien, K. A 1-MV, 1-MA, 0.1-Hz linear transformer driver utilizing an internal water transmission line / K. LeChien, M. Mazarakis, W. Fowler, W. Stygar, F. Long, R. McKee, G. Natoni, J. Porter, K. Androlewicz, T. Chavez, G. Feltz, V. Garcia, D. Guthrie, R. Mock, T. Montoya, J. Puissant, A. Smith, P. Wakeland, K. Ward, D. Van De Valde, A. Kim // *17th IEEE Pulsed Power Conference*. – Washington, D.C., USA, 2009. – P. 1186–1191.
36. Mazarakis, M.G. High current linear transformer driver (LTD) development at Sandia National Laboratories / M.G. Mazarakis, W.E. Fowler, K.L. LeChien,

- F.W. Long, M.K. Matzen, D.H. McDaniel, R.G. McKee, C.L. Olson, J.L. Porter, S.T. Rogowski, W. Struve, W.A. Stygar, J.R. Woodworth, A.A. Kim, V.A. Sinebryukhov, R.M. Gilgenbach, M.R. Gomez, D.M. French, Y.Y. Lau, J.C. Zier, D.M. VanDevalde, R.A. Sharpe, K. Ward // *IEEE Transactions On Plasma Science*, 2010. – V. 38. – № 4. – P. 704–713
37. Stygar, W.A. Architecture of petawatt-class z-pinch accelerators / W.A. Stygar, M.E. Cuneo, D.I. Headley, H.C. Ives, R.J. Leeper, M.G. Mazarakis, C.L. Olson, J.L. Porter, T.C. Wagoner, J.R. Woodworth // *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*, 2007. – V. 10. – P. 1–24.
38. Ратахин, Н.А. Компактный импульсный генератор для питания рентгенографического источника / Н.А. Ратахин, В.Ф. Федущак, А.А. Эрфорт, Н.В. Жарова, Н.А. Жидкова, С.А. Чайковский, В.И. Орешкин // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2007. – Т. 50. – № 2. – С. 87–92.
39. Пикуз, С.А. X-пинч, экспериментальные исследования / С.А. Пикуз – Дис. д-ра ф.-м.н.-к, Москва, 2007. – 238 с.
40. General Atomics Electronic Systems, Inc. High energy density capacitors for pulsed power applications / F. MacDougall, J. Ennis, X.H. Yang, R.A. Cooper, J.E. Gilbert, J.F. Bates, C. Naruo, M. Schneider, N. Keller, S. Joshi, T.R. Jow, J. Ho, C.J. Scozzie, S.P.S. Yen, // *IEEE Pulsed Power Conference*. – Washington D.C., USA, 2009. – P. 774–778.
41. Ennis, J.B. Recent advances in high voltage, high energy capacitor technology / J.B. Ennis, F.W. MacDougall, X.H. Yang, R.A. Cooper, K. Seal, C. Naruo, B. Spinks, P. Kroessler, J. Bates // *16th IEEE International Pulsed Power Conference*. – Albuquerque, NM, 2007. – P. 282–285.
42. Sorrento Electronics, Inc. High energy capacitors overview // *Engineering Bulletin*, 2002. – P. 1–11.

43. Каталог ОАО «СКЗ «КВАР» 2015 // ОАО «СКЗ “КВАР”» [Электронный ресурс]. – URL: <http://kvar.su/wp-content/uploads/2015/05/kvar-2015.pdf> (дата обращения: 23.09.15).
44. Каталог ЗАО «Русская Технологическая Группа» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.rustechgroup.ru> (дата обращения: 23.09.15).
45. Каталог. Конденсаторы с органическим диэлектриком. ЗАО «ЭЛКОД» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.elcod.spb.ru/catalogue.pdf> (дата обращения: 23.09.15).
46. General Atomics [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ga.com/capacitor-product-guide> (Дата обращения: 23.09.15)
47. Mercer, S. A Compact, Multiple Channel 3 MV Gas Switch / S. Mercer, I. Smith, T. Martin // Proc. of the I Intern. Conf. on Energy Storage, Compression, and Switching. – Asti-Torino, Italy, 1974. – P. 459–462.
48. Байков, А.П. Мощный импульсный генератор тока / А.П. Байков, А.М. Искольдский, Б.М. Ковальчук, Г.А. Месяц, Ю.Е. Нестерихин // Приборы и техника эксперимента. – 1970. – № 6. – С. 81.
49. Bostrikov, A.N. Fast primary energy storage based on linear transformer scheme / A.N. Bostrikov, A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, E.V. Kumpjak, S.V. Loginov, V.I. Manylov, V.A. Visir, V.P. Yakovlev, B. Etlicher, A. Chuvatin, L. Frescaline, J.F. Leon, P. Monjaux, F. Kovacs, D. Huet, F. Bayol. // Digest of Technical Papers of 11th IEEE International Pulsed Power Conference. – Baltimore, MA, USA, 1997. – V. 1. – P. 489–497.
50. Синябрюхов, В.А. Быстрые ступени линейного трансформатора (LTD) с масляной изоляцией / В.А. Синябрюхов: Дис. канд.тех.наук. – Томск, 2009. – 103 с.
51. Woodworth, J.R. Low-inductance gas switches for linear transformer drivers / J.R. Woodworth, J.A. Alexander, F.R. Gruner, W.A. Stygar, M.J. Harden, J.R. Blickem, G.J. Dension, F.E. White, L.M. Lucero, H.D. Anderson, L.F. Bennett, S.F. Glover, D. Van DeValde, M.G. Mazarakis // Phys. Rev. ST

- Accel. Beams, 2009. – V. 12. – Iss. 6. – 060401. – DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.12.060401.
52. Woodworth, J.R. New low inductance gas switches for linear transformer drivers / J.R. Woodworth, W.A. Stygar, L.F. Bennett, M.G. Mazarakis, H.D. Anderson, M.J. Harden, J.R. Blickem, F.R. Gruner, R. White // Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2010. – V. 13. – Iss. 8. – 080401. – DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.13.080401.
53. Ковальчук, Б.М. Сильноточные наносекундные коммутаторы / Б.М. Ковальчук, В.В. Кремнев, Ю.Ф. Поталицын. – Новосибирск: Наука, 1979. – 176 с.
54. Vitkovitsky, I.M. High Power Switching / I. Vitkovitsky. – N.Y.: Van Nostrand Reinhold, 1987. – 304 p.
55. Месяц, Г.А. Пикосекундная электроника больших мощностей / Г.А. Месяц, М.И. Яландин // Успехи физических наук. – 2005. – Вып. 9. – С. 225–246.
56. Yushkov, G.Y. Gyrotron Microwave Heating of Vacuum Arc Plasma for High-Charge-State Metal Ion Beam Generation / G.Y. Yushkov, A.V. Vodopyanov, A.G. Nikolaev, I.V. Izotov, K.P. Savkin, S.V. Golubev, E.M. Oks // IEEE Transactions On Plasma Science, 2013. – V. 41. – № 8. – P. 2081–2086.
57. Anders A. Angularly Resolved Measurements of Ion Energy of Vacuum Arc Plasmas / A. Anders, G.Y. Yushkov // Applied Physics Letters. – 2002. – V. 80. – № 14. – P. 2457–2459.
58. Петин, В.К. Источник рентгеновского излучения для облучения объектов большой площади / В.К. Петин, С.В. Шляхтун, В.И. Орешкин, Н.А. Ратахин // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – Вып. 6. – С. 103–109.
59. 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.
60. Rostov, V.V. Repetitive Production of Nanosecond Gigawatt Microwave Pulses / V.V. Rostov, M.I. Yalandin, G.A. Mesyats // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2008. – V. 36. – № 3. – P. 655–660.
61. Mesyats, G.A. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines / G.A. Mesyats, S.D. Korovin, A.V. Gunin, V.P. Gubanov, A.S. Stepchenko, D.M. Grishin, V.F. Landl, P.I. Alekseenko // Laser And Particle Beams. – 2003. – V. 21. – No 2. – P. 197–209.
62. 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. Федюнин, 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.
63. Pereira, N.R. X-rays from Z-pinches on relativistic electron beams generators / N.R. Pereira, J. Davis // J. Appl. Phys. – 1988. – V. 64. – P. R1–R27.
64. Rousskikh, A.G. Use of vacuum arc plasma guns for a metal puff Z-pinch system / A.G. Rousskikh, A.S. Zhigalin, V.I. Oreshkin, S.A. Chaikovsky, N.A. Labetskaya, R.B. Baksht // Physics of Plasmas. – 2011. – V. 18. – No 9. – 092707. – P. 1–6.
65. 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. – V. 55. – No 10/3. – P. 23–25.
66. 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.

67. Jons, B. K-shell radiation physics in low- to moderate-atomic-number z-pinch plasmas on Z-accelerator / B. Jons, C. Deeney, C.A. Coverdale, P.D. LePell, J.L. McKeeney, J.P. Apruzese, J.W. Thornhill, K.G. Whitney, R.W. Clark, A.L. Velikovich, J. Davis, Y. Maron, V. Kantsyrev, A. Safonova, V.I. Oreshkin. // *J. Quant. Spectrosc. Radiative Transfer*. – 2006. – V. 99. – P. 341–348.
68. Королев, Ю.Д. Физика импульсного пробоя газов / Ю.Д. Королев, Г.А. Месяц. – М.: Наука, 1991. – 224 с.
69. Месяц, Г.А. О динамике формирования субнаносекундного электронного пучка в газовом и вакуумном диоде / Г.А. Месяц, С.Д. Коровин, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // *Письма в журнал технической физики*. – 2006. – Т. 32. – № 1. – С. 35–44.
70. Oreshkin, E.V. Bremsstrahlung of fast electrons in long air gaps / E. V. Oreshkin, S. A. Barengolts, S. A. Chaikovsky, A. V. Oginov, K. V. Shpakov, V. A. Bogachenkov // *Physics of plasmas*. – 2012. – V. 19. – No.1. – P.013108(1–5).
71. Smirnov, V.P. Fast liners for inertial fusion / V.P. Smirnov // *Plasma Phys. Controlled Fusion*. – 1991. – V. 33. – No. 13. – P. 1697–1714.
72. Ryutov, D.D. The physics of fast Z pinches / D.D. Ryutov, M.S. Derzon, M.K. Matzen // *Rev. Modern Phys*. – 2000. – V. 72. – No. 1. – P. 167–223.
73. Haines, M.G. A review of the dense Z-pinch / M.G. Haines // *Plasma Phys. Control. Fus*, 2011. – V.53. – N. 9. – 093001. – P. 1–168.
74. Грабовский, Е.В. Генерация мощных ударных волн мягким рентгеновским излучением плазмы Z-пинча / Е.В. Грабовский, О.Ю. Воробьев, К.Н. Дябилин, М.Е. Лебедев, А.В. Острик, В.Е. Фортов. // *Письма в ЖЭТФ*. – 1994. – Т. 60. – Вып. 1. – С. 3–6.
75. Sanford, T. W.L. Dynamics and characteristics of a 215-eV dynamic-hohlraum x-ray source on Z / T.W.L. Sanford, R.W. Lemke, R.C. Mock, G.A. Chandler, R.J. Leeper, C.L. Ruiz, D.L. Peterson, R.E. Chrien, G.C. Idzorek, R.G. Watt, J.P. Chittenden // *Phys. Plasmas*. – 2002. – V. 9. – No. 8. – P. 3573–3594.

76. Oreshkin, V.I. Optimization of the parameters of plasma liners with zero-dimensional models / V.I. Oreshkin // *Phys. Plasmas*. – 2013. – V. 20. – No. 11. – 112505. – P. 1–9.
77. Loeb, L.B. *Fundamental Processes of Electrical Discharge in Gases* / L.B. Loeb – New York: J. Willey and Sons, 1939. – 717 c.
78. Yatom, S. Space-and time-resolved characterization of nanosecond time scale discharge at pressurized gas / S. Yatom, V. Vekselman, J.Z. Gleizer, Y.E. Krasik // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – V. 109. – No. 7. – 073312. – P. 1–5.
79. Oreshkin, E.V. Simulation of the runaway electron beam formed in a discharge in air at atmospheric pressure / E.V. Oreshkin, S.A. Barengolts, S.A. Chaikovsky, V.I. Oreshkin // *Physics of plasmas*. – 2012. – V. 19. – No. 4. – 043105. – P. 1–9.
80. Toepler, M. Zur Kenntnis der Gesetze der Gleitfunkenbildung / M. Toepler // *Annalen der Physik*. – 1906. – Iss. 21. –No. 12. – P. 193–222.
81. Weizel, W. Theorie des elektrischen Funkens / W. Weizel, R. Rompe // *Annalen der Physik*. – 1947. – Iss. 1. – P. 285–300.
82. Grünberg, R. Gesetzmäßigkeiten von Funkenentlandungen im Nanosekundebereich / R. Grünberg // *Zs. für Naturforschung*. – 1965. – B. 20a. – H. 2. – P. 202–212.
83. Брагинский, С.И. К теории развития канала искры / С.И. Брагинский // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1958. – Т. 34. – № 6. – С. 1548–1557.
84. Martin, T.H. Energy losses in switches / T.H. Martin, J.F. Seamen, D.O. Jobe // *Proc. of 9th IEEE Inter. Pulsed. Power Conf.* – Albuquerque, New Mexico, USA, 1993. – P. 463–470.
85. Martin, J.C. Multichannel gaps / J.C. Martin // *Advances in Pulsed Power Technology*. – 1996. – V. 3. – Ch. 10. – P. 295–333.

86. Feduschak, V.F. Intense pulsed x-ray source for high-speed radiography / V.F. Feduschak, A.A. 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, Russia, 2008. – V. 1. – P. 232–233.
87. Ratakhin, N.A. Table-top pulse power generator for soft x-ray radiography / N.A. Ratakhin, V.F. Feduschak, A.A. Erfort, A.V. Saushkin, N.V. Zharova, S.A. Chaikovsky, V.I. Oreshkin // Proc. of 14th Int. Conf. on High Current Electronics. – Tomsk, Russia, 2006. – V. 1. – P. 511–513.
88. 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.
89. 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, Russia, 2010. – P. 300–302.
90. Эрфорт, А.А. Рентгеновская установка для высокоскоростной радиографии / 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.
91. Feduschak, V.F. Compact pulsed power generator / V.F. Feduschak, N.V. Zharova, I.V. Lavrinovich, V.I. Oreshkin, A.V. Fedunin, A.A. Erfort // Proc. of 15th Int. Conf. on High Current Electronics. – Tomsk, Russia, 2008. – V. 1. – P. 303-304.
92. 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.

93. Lavrinovich, I.V. 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
94. Месяц, Г.А. Источник субнаносекундных импульсов мягкого рентгеновского излучения на основе X-пинча и малогабаритного низкоиндуктивного генератора тока / Г.А. Месяц, Т.А. Шелковенко, Г.В. Иваненков, А.В. Агафонов, С.Ю. Савинов, С.А. Пикуз, И.Н. Тиликин, С.И. Ткаченко, С.А. Чайковский, Н.А. Ратахин, В.Ф. Федощак, В.И. Орешкин, А.В. Федюнин, А.Г. Русских, Н.А. Лабецкая, А.П. Артемов, Д.А. Хаммер, Д.Б. Синарс // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2010. – Т. 138. – Вып. 3. – С. 411–420.
95. 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.
96. Пат. 75783 РФ. МПК Н 01 G 4/00, Н 01 Т 2/02 Высоковольтный конденсатор со встроенным управляемым коммутатором / В.С. Верховский, Н.В. Жарова, И.В. Лавринович, В.Ф. Федущак // *БИПМ*, 2008. – № 23 (IV). – С. 1036.
97. ELCUT (TM), Версия 4.2.0.3. Производственный кооператив ТОР, Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. – URL: [http://elcut.ru/allnews/newvers\\_r.htm](http://elcut.ru/allnews/newvers_r.htm) (дата обращения: 01.10.2015).
98. 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, Russia, 2010. – P. 300–302.
99. Lavrinovich, I.V. Nanosecond current generator based on a single «HCEIcap 80-0,25» capacitor-switch assembly / I.V. Lavrinovich, N.V. Zharova, M.G. Vyukova // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2012. – V. 55. – No. 10/3. – P. 253–255.

100. 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, N.V. Zharova // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – № 11/3. – Р. 26–29.
101. 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.
102. Kim A. Prefire probability of the switch type Fast LTD / A. Kim, S. Frolov, V. Alexeenko, V. Sinebryukhov, M. Mazarakis, F. Bayol, // Proc. of the IEEE Pulsed Power Conference. – Washington, D.C., USA, 2009. – P. 565–570.
103. Ратахин, Н.А. «Пескарь» – генератор электронных пучков для технологических применений / Н.А. Ратахин, В.Ф. Федущак, А.Н. Шепелев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1995. – Т. 38. – № 12. – С. 95–98.
104. Erfort, A.A. High-voltage pulse transformer / A.A. Erfort, V.F. Feduschak, I.V. Lavrinovich // Proc. of 16th Int. Symp. on High Current Electronics. – Tomsk, Russia, 2010.– P. 285–287.
105. 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.
106. Жарова, Н.В. Быстрый вывод энергии из сильнооточного импульсного конденсатора НСЕІсар 50-0,1 с помощью псевдоискрового разрядника TDI1-50K/50 / Н.В. Жарова, Н. А. Ратахин, А. В. Саушкин, В. Ф. Федущак, А. А. Эрфорт // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 3. – С. 96–99.

107. Молотилов, Б.В. Прецизионные сплавы: справочник / под ред. Б.В. Молотилова. – М.: Металлургия, 1983. – 448 с.
108. 2В - магнитопровод из аморфного сплава АМЕТ-2НСР. ПАО «Ашинский метзавод» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.amet.ru/buyers/product/amorf/2b/> (дата обращения: 23.09.15).
109. Ратахин, Н.А. Высоковольтная изоляция мощного импульсного трансформатора / Н.А. Ратахин, В.Ф. Федущак // Изв. вузов. Физика. – 1999. – Т. 42. – № 12. – С. 15.

## ПРИЛОЖЕНИЯ



ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ТРОИЦКИЙ ИНСТИТУТ ИННОВАЦИОННЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

(АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)

Адрес: 142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, владение 12, Телеграф/мелекс: 206178 LINER RU,  
Телеграф: г. Москва, г. Троицк, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Телефакс: +7(495) 841-57-76; E-mail: liner@triniti.ru; WEB-сервер: www.triniti.ru  
ОКПО: 08624272; ОГРН: 1157746176400; ИНН/КПП: 7751002460/775101001

18.03.2016. № 226-10/22/464

на \_\_\_\_\_

В Диссертационный совет Д 003.031.02  
634055, г.Томск, пр-т Академический, 2/3.

### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Лавриновича И.В. на тему:  
«Конденсаторно-коммутаторные сборки с субмикросекундными временами  
вывода энергии для компактных сильноточных импульсных генераторов»

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы, представляемой Лавриновичем И.В. на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки, актуальны для развития технологии высоковольтных генераторов импульсной электрической мощности, которые используются для создания плотной высокотемпературной плазмы и мощных источников рентгеновского излучения. Результаты диссертации, посвященные созданию импульсных электрических генераторов субмикросекундной длительности, представляют несомненный практический интерес и были использованы в нашем институте на установке Ангара-5-1 при реализации рентгеновской радиографии многопроволочных лайнеров с помощью отдельного компактного импульсного генератора тока с нагрузкой в виде рентгеновского X-пинча.

Акт составил  
в.н.с., кандидат физ.-матем. наук,  К. Н. Митрофанов

Акт рассмотрен и одобрен на секции №2 НС АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,  
протокол №189 от 26.01.2016.

Председатель секции №2 НС,  
директор отделения АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

 Е.В. Грабовский

Генеральный директор,  
д-р физ.-матем. наук,  
профессор

 В. Е. Черковец



Исп. К.Н. Митрофанов, ОФТП, тел. 8(495)84115814

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический  
ИНСТИТУТ**



*имени  
П.Н.Лебедева*

Российской академии наук

**Ф И А Н**

119991, ГСП-1, Москва,  
Ленинский проспект, 53, ФИАН  
Телефоны: (499) 135 1429  
(499) 135 4264  
Телефакс: (499) 135 7880  
<http://www.lebedev.ru>  
[postmaster@lebedev.ru](mailto:postmaster@lebedev.ru)

В Диссертационный совет Д 003.031.02

634055, г.Томск, пр-т Академический, 2/3.

Дата *16.03/6* № *11220-9311-284*

На № от

### Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Лавриновича И.В. на тему: «Конденсаторно-коммутаторные сборки с субмикросекундными временами вывода энергии для компактных сильноточных импульсных генераторов» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы при исследовании характеристик источников мягкого рентгеновского излучения, получаемых при работе компактного сильноточного импульсного генератора на различные х-пинч нагрузки.

Ученый секретарь ФИАН



Цвентух М.М.