

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИСЭ СО РАН)

На правах рукописи



Жерлицын Андрей Алексеевич

**МОЩНЫЕ ЛТД ГЕНЕРАТОРЫ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ВОЗДУХОМ АТМОСФЕРНОГО  
ДАВЛЕНИЯ И ВРЕМЕНЕМ ВЫВОДА ЭНЕРГИИ ПОРЯДКА 100 НС**

Специальность 1.3.13 Электрофизика, электрофизические установки

Диссертация  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Томск – 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Обзор литературы.....	13
1.1 ЛТД технология построения импульсных генераторов.....	13
1.2 ЛТД ступени.....	17
1.3 ЛТД генераторы .....	32
1.4 Выводы.....	38
2 Многоазорный многоканальный разрядник атмосферного давления с рабочим напряжением до 100 кВ для секций ЛТД ступеней с временем вывода энергии порядка 100 нс.....	41
2.1 Конструкция разрядника.....	41
2.2 Схема запуска разрядника.....	43
2.3 Схема исследования параметров разрядника.....	48
2.4 Стабильность срабатывания разрядника (джиттер разрядника).....	52
2.5 Число каналов в разряднике.....	55
2.6 Ресурс разрядника.....	60
2.7 Выводы.....	61
3 Секции ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления и зарядным напряжением до 100 кВ.....	63
3.1 Конденсаторы секций.....	63
3.2 Конструкция секций.....	67
3.3 Параметры секций.....	70
3.4 Ресурс секций.....	80
3.5 Моделирование разряда секций, потери энергии в разряднике.....	83
3.6 Выводы.....	94
4 ЛТД ступень с изоляцией воздухом атмосферного давления, мегаамперным уровнем тока и временем нарастания импульса 100 нс.....	96

4.1	Конструкция ЛТД ступени.....	96
4.2	Параметры разряда сегмента ЛТД ступени.....	99
4.3	Параметры ЛТД ступени.....	101
4.4	Испытание проходного вакуумного изолятора.....	109
4.5	Последовательное включение двух ступеней.....	110
4.6	Сравнение ЛТД ступеней с воздушной и масляной изоляцией .....	113
4.7	Проект ЛТД генератора электронного ускорителя для возбуждения газовой активной среды объемом 600 литров.....	114
4.8	Выводы.....	122
5	ЛТД генератор для фемтосекундной лазерной системы ТНЛ-100.....	123
5.1	Конструкция газового усилителя на основе ЛТД генератора .....	123
5.2	Ступень ЛТД генератора.....	124
5.3	Модуль из шести ЛТД ступеней.....	126
5.4	Параметры генератора в составе двух модулей из двенадцати ЛТД ступеней и усилителя на его основе .....	134
5.5	Сравнение ЛТД генератора ТНЛ-100 с ранее созданным генератором для лазерной системы.....	136
5.6	Выводы.....	137
6	Модуль мультимегаамперной ЛТД установки.....	138
6.1	ЛТД ступень модуля .....	138
6.2	Модуль в составе двух ЛТД ступеней.....	159
6.3	Модуль в составе пяти ЛТД ступеней .....	162
6.4	Проект мультимегаамперной ЛТД установки.....	167
6.4	Выводы.....	172
7	Примеры применения импульсных генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления.....	173
7.1	Субмикросекундный генератор тока для экспериментов с лайнерными нагрузками .....	174
7.2	ЛТД генератор для радиографии.....	175
7.3	Источник СВЧ-излучения на основе ЛТД генератора.....	177

7.4 Компактный генератор для источника электронного пучка.....	178
7.5 Источник сильноточного электронного пучка субмикросекундной длительности с взрывоэмиссионным катодом и вспомогательным разрядом, инициируемым предымпульсом.....	183
7.6 Электронный источник с плазмонаполненным диодом.....	192
7.7 Выводы.....	199
Заключение.....	200
Список литературы.....	204

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы и степень ее разработанности**

Исследования в области мощных высоковольтных импульсных генераторов инициированы в начале 1960-х годов в США и СССР в целях имитации радиационных эффектов тормозным рентгеновским излучением, а также сверхбыстрого нагрева вещества до высоких (термоядерных) температур. В настоящее время развитие техники генерирования мощных импульсов стимулируется широким кругом исследовательских и прикладных задач, связанных с использованием интенсивных пучков заряженных частиц, мощного рентгеновского, лазерного и СВЧ излучений, сверхсильных импульсных магнитных полей и др.

Высокая пространственно-временная концентрация электромагнитной энергии в нагрузке достигается, как правило, за счет использования промежуточных накопителей энергии с импульсным режимом зарядки. В наиболее мощных и энергоемких генераторах применяются емкостные промежуточные накопители энергии в виде линий с жидким диэлектриком (генераторы Aurora, Double-EAGLE, PBFA-Z, Saturn, Ангара-5, PTS, ЛИУ-30, Гамма-4 и др. [1-12]) и индуктивные промежуточные накопители энергии с плазменным прерывателем тока (генераторы ГИТ-4, ГИТ-12, HAWK, ACE-4, Decade Quad и др. [13–17]). Как емкостные, так и индуктивные промежуточные накопители мощных установок заряжаются от первичных емкостных накопителей энергии за время  $\sim 1$  мкс и более. Повышение мощности первичных накопителей позволяет сократить это время и улучшить характеристики промежуточных накопителей обоих типов. Кроме того, сокращение времени вывода энергии из первичных накопителей до  $\sim 100$  нс дает возможность совсем отказаться от промежуточных накопителей и включать первичный накопитель непосредственно на нагрузку. В результате упрощается конструкция, уменьшаются габариты и стоимость импульсных установок. Таким образом, повышение мощности и сокращение времени вывода энергии из первичных емкостных накопителей является актуальной задачей в современной импульсной технике. Немаловажной задачей является и разработка первичных накопителей энергии гибкой конфигурации, допускающей перестройку под определенную задачу и установку.

В настоящее время основными технологиями построения мощных субмикросекундных первичных накопителей с уровнем напряжения порядка  $10^6$  В и тока порядка  $10^6$  А являются “быстрые” генераторы Аркадьева–Маркса [18, 19] и их более мощная разновидность “impedance-matched Marx” [20–22], а также ЛТД генераторы (английская аббревиатура LTD – Linear Transformer Driver) [23, 24].

Последние относятся к генераторам индукционного типа. В них первичные емкостные накопители энергии (конденсаторы) со своими разрядниками размещены непосредственно в корпусе индуктора, получившего название ЛТД ступень. ЛТД технология построения генераторов предложена и разрабатывалась с середины 1990-х годов под руководством академика Б.М. Ковальчука в ИСЭ СО РАН (г. Томск). В качестве основных достоинств технологии можно назвать:

- отсутствие разрядников на полное выходное напряжение;
- возможность независимого запуска каждой ступени от внешнего пускового импульса;
- возможность параллельно-последовательного соединения ступеней в зависимости от требований к генератору;
- отсутствие общего бака с изолирующей средой.

В настоящее время ЛТД технология рассматривается как одна из наиболее перспективных для создания генераторов сверхмощных импульсов (порядка 1 000 ТВт), способных ввести в низкоиндуктивную нагрузку типа Z-пинч ток более 50 МА за время  $\sim 100$  нс, в том числе для целей УТС [25–30]. Использование ЛТД генераторов привлекательно и для других приложений, где требуется высокая пиковая мощность: накачка газовой активной среды мощных лазеров электронным пучком, получение мощных импульсов рентгеновского и СВЧ излучений, исследование динамических свойств материалов при ударно-волновом и квази-изэнтропическом нагружении и др.

К моменту начала работ по теме диссертации уже были созданы ступени ЛТД генераторов с временем вывода энергии в нагрузку порядка 100 нс, позволяющие создавать установки гига– и тераваттного уровней мощности [23, 31, 32]. В этих ступенях при зарядном напряжении  $\pm 100$  кВ для изоляции использовалось трансформаторное масло. Коммутация конденсаторов осуществлялась воздушными искровыми разрядниками, работающими при давлении около 3 атм.

Применение воздуха атмосферного давления в качестве изолирующей среды внутри ЛТД ступеней делает возможным их техническое обслуживание и ремонт без полной разборки ЛТД генератора. Отказ от использования масла в изоляции ступени позволяет упразднить маслохозяйство, а отсутствие избыточного давления внутри разрядников упрощает их конструкцию и эксплуатацию. Кроме того, использование воздуха привлекательно, поскольку в отличие от других газов или смесей он бесплатный, не токсичен и не требует дополнительных резервуаров для хранения. Актуальной является разработка ЛТД ступеней и генераторов на их основе с временем вывода энергии в нагрузку порядка 100 нс, надежно работающих при зарядном напряжении до 100 кВ в воздухе атмосферного давления. Здесь следует отметить, что в схеме Аркадьева–Маркса необходимо изолировать верхние ступени на полное напряжение, что делает практически невозможным их использование с воздушной изоляцией атмосферного давления при мегавольтном уровне напряжения. Поэтому ЛТД технология является основным кандидатом для построения мощных генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления.

### **Цель и задачи работы**

Цель работы заключалась в создании ЛТД генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления с временем вывода энергии порядка 100 нс и зарядным напряжением до 100 кВ. В рамках поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Разработка единого блока (секции) из конденсаторов и искрового газового разрядника, работающего в воздухе атмосферного давления при зарядном напряжении до 100 кВ. Разработка искрового разрядника, работающего в среде воздуха атмосферного давления при напряжении до 100 кВ и обеспечивающего вывод энергии из конденсаторов секции за время порядка 100 нс.
2. Разработка и создание ЛТД ступеней с временем вывода энергии из емкостного накопителя порядка 100 нс, работающих в воздухе атмосферного давления при зарядном напряжении до 100 кВ.
3. Разработка ЛТД генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления и временем вывода энергии порядка 100 нс, допускающих проведение профилактических и ремонтных работ без полной разборки.

4. Апробация ЛТД генераторов для питания сильноточных электронных диодов и низкоиндуктивных нагрузок.

### **Научная новизна работы**

1. Создан управляемый семизазорный шестиканальный газовый разрядник планарной конфигурации, работающий в сухом воздухе атмосферного давления при напряжении до 100 кВ и имеющий индуктивность около 20 нГн. При амплитуде тока через разрядник около 50 кА и переносимом заряде за импульс около 14 мКл разрядник сохраняет работоспособность с наносекундной точностью включения в серии из  $10^5$  импульсов без какого-либо обслуживания.
2. Разработаны, изготовлены и исследованы несколько вариантов ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления и максимальным зарядным напряжением 100 кВ, обеспечивающих время вывода энергии в нагрузку от 150 нс до 300 нс и амплитуду тока разряда от 0.1 МА до 1 МА с фронтом 100–160 нс.
3. Разработан проект импульсного генератора в составе двух модулей, каждый из которых включает двенадцать ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления с запасаемой энергией до 190 кДж и пиковой выходной мощностью 700 ГВт для возбуждения газовой активной среды объемом 600 литров.
4. Разработан модуль в составе двенадцати ЛТД ступеней с воздушной изоляцией и передающей линией с водяным заполнением для проекта ЛТД установки с амплитудой импульса тока более 8 МА и фронтом импульса 200–300 нс (по уровню 0.1–0.9) на нагрузке типа лайнер.
5. На основе ЛТД генератора с изоляцией воздухом атмосферного давления реализованы компактные источники сильноточного электронного пучка субмикросекундной длительности, использующие диод со взрывоэмиссионным катодом и вспомогательный разряд на потенциальном электроде. Питание вспомогательного разряда осуществляется от специальных секций емкостного накопителя внутри ЛТД ступеней либо от отдельного генератора. При токе в диоде 150 кА выходное напряжение источника может достигать 2 МВ.
6. Предложен способ определения напряжения в вакуумной нагрузке на основе только измерения тока в короткозамкнутой линии с начальным током



подмагничивания без использования датчика напряжения. Способ апробирован в экспериментах при уровне напряжения до 2 МВ.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы заключается в создании элементной базы для субмикросекундных генераторов с зарядным напряжением до 100 кВ без масляной изоляции и повышенного давления газа.

Созданные ЛТД генераторы позволяют осуществлять относительно простую перестройку емкостного накопителя под определенные требования к электрофизической установке, проводить профилактику и ремонт емкостного накопителя без полной разборки генератора.

Созданные разрядники, секции, ЛТД ступени и ЛТД генераторы использовались, используются, либо планируются к использованию в организациях:

- Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия);
- Компания ITHPP (Франция);
- Технион – Израильский технологический институт (Израиль);
- РФЯЦ-ВНИИТФ (Россия).

### **Методы исследования**

Основным методом исследований являлся эксперимент. Использовались прошедшие многолетнюю проверку способы диагностики быстропротекающих электрофизических процессов, адаптированные и доработанные с учетом поставленных задач.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Созданы секции ЛТД ступней из параллельно включенных конденсаторов и многоазорного многоканального искрового разрядника в едином корпусе из компаунда на основе эпоксидной смолы, работающие в воздухе атмосферного давления при зарядном напряжении 100 кВ с временной постоянной разряда от 30 нс до 90 нс и мощностью вывода энергии от 1 ГВт до 2.5 ГВт. Жесткий корпус секции усиливает внешнюю изоляцию и делает возможным эксплуатацию конденсаторов не в масле, как регламентировано производителем, а также

улучшает эксплуатационные качества секции, расширяя возможности по компоновки емкостных накопителей. Конденсаторы в жестком корпусе из эпоксидного компаунда способны, как и в масле, обеспечить наработку до  $10^5$  импульсов при зарядном напряжении 90–95 кВ в режиме разряда с реверсом 10 %, при этом разрядник секции сохраняет работоспособность без обслуживания. Временная постоянная секций с изоляцией воздухом атмосферного давления не превышает временной постоянной секций ЛТД ступеней с масляной изоляцией.

2. Впервые создана ЛТД ступень с изоляцией воздухом атмосферного давления с выходным импульсом тока амплитудой мегаамперного уровня и временем нарастания около 100 нс. В ступени реализовано основное достоинство подхода, связанного с использованием воздушной изоляции: возможность проведения профилактики и ремонта емкостного накопителя без полной разборки ступени, что критически важно в крупных установках, где используются модули из многих последовательно включенных ЛТД ступеней.
3. Создан импульсный генератор в составе двух модулей, каждый из которых включает двенадцать ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления, для уникальной мультитераваттной фемтосекундной лазерной системы видимого диапазона THL-100. Создание генератора демонстрирует прогресс в снижении длительности на полувысоте генерируемого импульса в электронном диоде с 700 нс до 250 нс, которое позволило сохранить пиковую мощность пучка на уровне свыше 100 ГВт при снижении запасаемой в емкостном накопителе энергии в 2.8 раза в сравнении с ранее созданным генератором для прямой накачки без формирующих линий газового лазера.
4. Создана ЛТД ступень с запасаемой энергией более 17 кДж, выходной мощностью 40 ГВт и амплитудой тока 1 МА. Ступень является самой мощной и энергоемкой из существующих ступеней с воздушной изоляцией. Впервые создан модуль из пяти ЛТД ступеней с воздушной изоляцией с мегаамперным уровнем тока. В модуле реализовано увеличение выходной мощности кратно числу ЛТД ступеней за счет увеличения напряжения при сохранении амплитуды тока, фронта импульса и времени вывода энергии в нагрузку.
5. Создан ряд генераторов, демонстрирующих преимущества ЛТД технологии и в частности ЛТД генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления для

построения мощных электрофизических установок прямого действия с субмикросекундным временем вывода энергии. ЛТД генераторы с воздушной изоляцией по совокупности параметров являются конкурентоспособными источниками высоковольтных сильноточных импульсов для научных исследований и прикладных применений.

### **Достоверность и апробация результатов работы, публикации**

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований; использованием независимых дублирующих экспериментальных методик; использованием прошедших многолетнюю проверку способов диагностики быстропротекающих электрофизических процессов; совпадением расчетных моделей с полученными экспериментальными данными; внутренней непротиворечивостью полученных результатов и их воспроизводимостью, а также их практической реализацией при создании генераторов.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на научных семинарах Института сильноточной электроники СО РАН, Томск; Международных симпозиумах по сильноточной электронике, Томск, Россия (2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2020, 2022); Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, Россия, 2008; Международной конференции по разрядам и электрической изоляции в вакууме, Томск, Россия, 2012; Международной конференции по импульсной энергетике и мощным пучкам частиц, Карлсруэ, Германия, 2012; Международной евроазиатской конференции по импульсной энергетике, Кумамото, Япония, 2014.

Результаты диссертации опубликованы в 40 статьях и полнотекстовых докладах в трудах Международных конференций и симпозиумов, в том числе 22 статьях в журналах, входящих в перечень периодических изданий ВАК.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора настоящей диссертационной работы состоит в определении направлений исследований, в подготовке, проведении и участии в экспериментах, в обработке экспериментальных результатов и написании научных статей, в

самостоятельном формулировании выводов и научных положений. Все результаты, составляющие научную основу диссертации и выносимые на защиту, получены при личном участии автора или под его непосредственным руководством. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, семи разделов, заключения и списка литературы, включающего 201 наименование. Общий объем диссертации составляет 228 страниц, включая 34 таблицы и 153 рисунка.

Во введении приведена общая характеристика работы, представлены защищаемые положения. Первый раздел представляет обзор наиболее важных, по мнению автора, имеющихся в научной литературе данных по тематике диссертации. Изложены основные принципы ЛТД технологии и состояние дел по теме диссертации, обоснованы задачи работы. Во втором разделе описаны принцип действия, конструкция, результаты испытаний и основные параметры многоазорного многоканального разрядника атмосферного давления с рабочим напряжением до 100 кВ для емкостного накопителя энергии с временем вывода энергии порядка 100 нс. Результаты разработки секций из параллельно включенных конденсаторов и искрового разрядника в едином жестком корпусе из компаунда на основе эпоксидной смолы представлены в третьем разделе. Четвертый раздел посвящен разработке и созданию ЛТД ступени с изоляцией воздухом атмосферного давления с током мегаамперного уровня, временем нарастания импульса около 100 нс и временем вывода энергии менее 200 нс. Рассматривается проект ЛТД генератора на основе такой ступени, предназначенный для накачки лазерной газовой активной среды объемом 600 л. В пятом разделе приведены результаты, связанные с созданием ЛТД генератора для фемтосекундной лазерной системы THL-100. Модуль из пяти мегаамперных ЛТД ступеней, использующих воздух в качестве изоляции, с выходной мощностью 190 ГВт описан в шестом разделе. Здесь же рассмотрен проект модуля в составе двенадцати мегаамперных ЛТД ступеней. В седьмом разделе представлены созданные импульсные генераторы с изоляцией воздухом атмосферного давления и примеры их применений. В заключение приведены основные результаты работы.

## 1 Обзор литературы

### 1.1 ЛТД технология построения импульсных генераторов

ЛТД генераторы относятся к импульсным генераторам индукционного типа наряду с линейными индукционными ускорителями (ЛИУ) [8, 9, 33–36], линейными импульсными трансформаторами (ЛИТ) [37–41] и индукционными сумматорами напряжения (IVA, английская аббревиатура – Inductive Voltage Adder) [42, 43]. ЛТД генератор представляют собой последовательный ряд идентичных индукторов, образующих индукционную систему (рисунок 1.1), при этом емкостной накопитель энергии располагается непосредственно внутри индукторов. Индуктор с емкостным накопителем получил название «ЛТД ступень», а индукционная система, составленная из ряда последовательно включенных идентичных ступеней – «ЛТД модуль». ЛТД генератор может состоять из одного или нескольких параллельно включенных модулей.

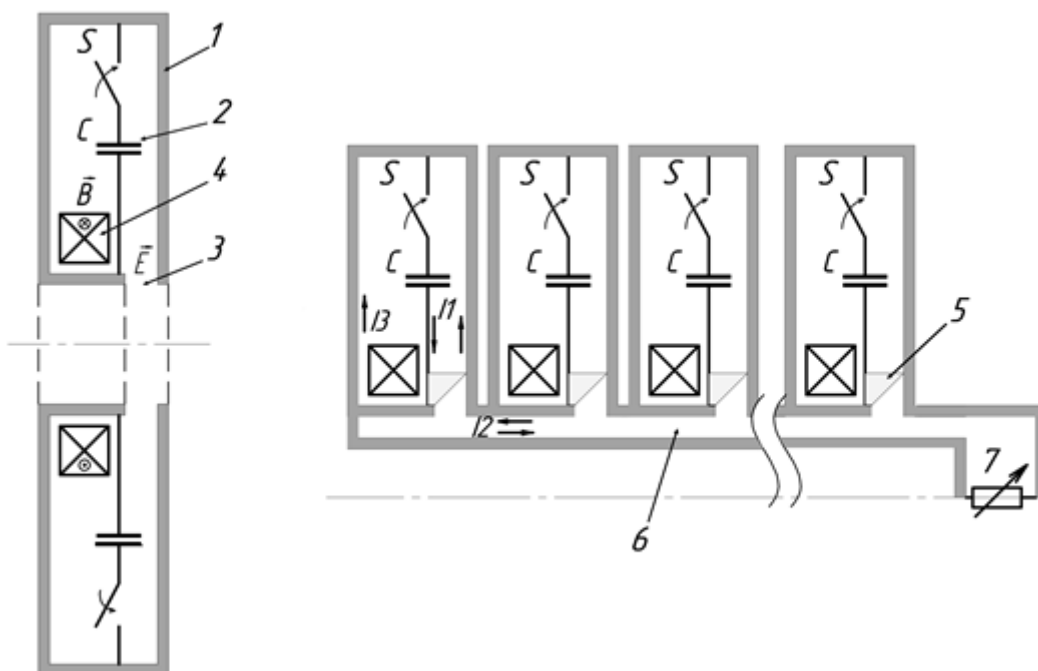


Рисунок 1.1 – Схема ЛТД ступени (слева) и ЛТД генератора (справа): 1 – корпус индуктора; 2 – емкостной накопитель энергии; 3 – промежуток с выходным напряжением; 4 – ферромагнитный сердечник; 5 – проходной изолятор; 6 – выходная линия; 7 – нагрузка

Емкостной накопитель ЛТД ступени составлен, как правило, из нескольких ( $N$ ) параллельно включенных идентичных ветвей, содержащих конденсаторы  $C$ , которые

заряжаются до напряжения  $U_0$  и коммутируются своим разрядником  $S$ . Ветвь емкостного накопителя со своим разрядником в ЛТД ступени называется «ЛТД секцией». При срабатывании разрядников секций формируется выходной импульс напряжения, который прикладывается к разрезу на внутреннем диаметре индуктора. На оси индукционной системы располагается цилиндрический выходной электрод, подключенный к нагрузке. Этот электрод и внутренние поверхности индукторов образуют коаксиальную выходную линию ЛТД модуля. В разрезах индукторов устанавливается проходной изолятор для разделения изолирующих сред ЛТД ступеней (газ или трансформаторное масло) и выходной линии (вакуум или вода).

Временная постоянная разряда ЛТД ступени зависит от ее конструкции, параметров секций и их компоновки. Выражение для временной постоянной ступени:

$$\tau_{\text{ступень}} = \sqrt{\left(\frac{L_{\text{секция}}}{N} + L_1\right) \cdot N C_{\text{секция}}} = \tau_{\text{секция}} \cdot \sqrt{1 + N \frac{L_1}{L_{\text{секция}}}}, \quad (1.1)$$

где  $\tau_{\text{секция}} = \sqrt{L_{\text{секция}} \cdot C_{\text{секция}}}$  – временная постоянная секции;

$C_{\text{секция}}$  – эквивалентная емкость конденсаторов секции;

$L_{\text{секция}}$  – индуктивность секции, включающая индуктивности конденсаторов, разрядника и токопроводов;

$N$  – число параллельных секций в ступени;

$L_1$  – индуктивность разрядного контура ступени за исключением индуктивности секций.

Если выполняется условие

$$L_1 \ll \frac{L_{\text{секция}}}{N}, \quad (1.2)$$

то временная постоянная ЛТД ступени определяется только временной постоянной единичной секции. Условие (1.2) также определяет пропорциональный рост амплитуды тока ЛТД ступени с увеличением  $N$ .

Поскольку временная постоянная ступени в значительной мере определяется временной постоянной секции  $\tau_{\text{секция}} = \sqrt{L_{\text{секция}} \cdot C_{\text{секция}}}$ , то для уменьшения длительности выходного импульса необходимо снижать как индуктивность, так и емкость секции. Возможности снижения индуктивности секции ограничены, т.к. она во многом определяется индуктивностями конденсатора и разрядника. Поэтому на практике основным подходом к снижению временной постоянной является снижение емкости секции, а необходимая емкость накопителя обеспечивается числом параллельно

включенных секций  $N$ :

$$C_{\text{ступень}} = N \cdot C_{\text{секция}}. \quad (1.3)$$

При большом числе секций  $N$  реализуется низкое волновое сопротивление ступени  $\rho_{\text{ступень}} = \sqrt{\frac{L_{\text{ступень}}}{C_{\text{ступень}}}}$  порядка 0.1–1 Ом.

Выходное напряжение ЛТД ступени не превышает зарядного напряжения емкостного накопителя. При последовательном включении ступеней напряжение на разрезах индукторов суммируется вдоль центрального электрода линии и прикладывается к нагрузке. С увеличением числа последовательно включенных ступеней в модуле и пропорциональном увеличении сопротивления нагрузки происходит увеличение волнового сопротивления модуля и выходного напряжения при сохранении тока модуля на уровне тока единичной ступени. Снижение волнового сопротивления и увеличение выходного тока достигается за счет параллельного включения идентичных ЛТД модулей. Одной из положительных черт ЛТД технологии является гибкость формирования импеданса системы под определенные требования.

На рисунке 1.1 показан путь замыкания тока. Для передачи импульса в нагрузку наличие замкнутой внешней поверхности индуктора не является обязательной. Более того, замкнутая поверхность приводит к появлению паразитного тока  $I_3$ , снижающего эффективность передачи энергии из конденсаторов секций в нагрузку. Для уменьшения тока утечек внутри корпуса ступени размещают сердечник из ферромагнитных материалов.

Вместе с тем, наличие короткозамкнутого контура обуславливает ряд достоинств:

- Замкнутая поверхность корпуса выполняет роль электромагнитного экрана, препятствует появлению напряжения снаружи;
- В отличие от генераторов Аркадьева–Маркса отсутствует необходимость в общем баке с изолирующей средой, что позволяет существенно снизить объем высоковольтной изоляции и увеличить удельную энергоемкость накопителя, дает возможность произвольного параллельно-последовательного соединения ступеней в зависимости от требований к генератору;
- Снижаются требования к изоляции ступени, поскольку на нее воздействует только зарядное напряжение;
- При необходимости можно избежать использования трансформаторного масла в

качестве изоляции емкостного накопителя, что крайне затруднительно в мегавольтных генераторах Аркадьева–Маркса из-за необходимости изолировать верхние ступени на полное выходное напряжение;

– Возможность независимого запуска каждой ступени от внешнего пускового импульса.

Независимый управляемый запуск, с одной стороны, позволяет обеспечить одновременный запуск разрядников ЛТД ступеней, что исключает развитие переходного процесса, который сопровождается возникновением высоковольтных колебаний, воздействующих на изоляцию, например, как в генераторах Аркадьева–Маркса. С другой стороны, независимый запуск каждой ступени позволяет использовать ЛТД генераторы в режиме индукционного сумматора напряжения (IVA).

Отличительной особенностью работы ЛТД генератора в режиме IVA является формирование выходного импульса в режиме бегущей волны, когда выходная линия модуля работает как передающая линия с распределенными параметрами и повышение амплитуды выходного импульса напряжения осуществляется пропорционально числу ступеней без изменения формы импульса. Для реализации названного режима необходимо выполнение двух основных условий [21]:

– Разрядники накопителей индукторов запускаются не одновременно, а последовательно с задержками по времени, равными электрической длине индуктора вдоль оси линии;

– Импеданс линии должен увеличиваться в направлении нагрузки кратно номеру индуктора (ступени).

В реальных установках профиль линии проектируют исходя из производственной целесообразности, допуская некоторое искажение выходного импульса. Например, изменение волнового сопротивления делают не после одного индуктора, а после группы индукторов.

Длина современных ЛТД ступеней вдоль оси не превышает 30 см. Поэтому при вакуумной изоляции выходной коаксиальной линии электромагнитная волна проходит путь между ускорительными зазорами соседних ступеней за время менее 1 нс, что соизмеримо с временем разброса срабатывания разрядников ЛТД ступеней и много меньше длительности фронта генерируемого импульса. На момент написания диссертационной работы эффективность функционирования ЛТД генератора с



вакуумной выходной линии в режиме индукционного сумматора напряжения была подтверждена лишь в моделировании [44, 45].

При водяном заполнении выходных линий электрическая длина ЛТД ступени возрастает в 9 раз и при геометрической длине ступени 30 см составит  $\approx 10$  нс. Эта величина уже больше разброса срабатывания разрядников и соизмерима с длительностью фронта генерируемого импульса. В этом случае целесообразность работы ЛТД генератора в режиме индукционного сумматора напряжения более очевидна. При этом также появляется возможность варьировать параметры выходного импульса за счет задержки запуска ЛТД ступеней [46] или профиля водяной передающей линии [47]. Первые результаты по исследованию работы ЛТД ступеней на водяную выходную линию были получены в работах [48, 49], где использовался модуль из двух маслonaполненных 1 МА ЛТД ступеней (MYKONOS II).

## 1.2 ЛТД ступени

1.2.1 ЛТД ступени с временем нарастания импульса тока около 1 мкс (микросекундные ЛТД ступени)

Первые ЛТД ступени [50, 51] были созданы во второй половине 1990-х годов в ИСЭ СО РАН академиком Б.М. Ковальчуком. Эти ступени состояли из двух секций. Каждая секция включала в себя один конденсатор фирмы HAEFELY с относительно большой емкостью в единицы мкФ. Конструкция ступени LTD-02 на основе конденсаторов с параметрами 75 кВ, 5.65 мкФ, 13 нГн, 45 МОм приведена на рисунке 1.2, а. В ступени использовалось трансформаторное масло для изоляции токоведущих шин, вводов зарядного и пускового напряжения, а также поверхности раздела между конденсаторами и разрядниками. Использовался разрядник типа MMCS коаксиальной геометрии, конструкция которого изображена на рисунке 1.3. Разрядник имеет пять зазоров по 4.5 мм между сферическими стальными электродами диаметром 23.5 мм. Электроды образуют 20 каналов, расположенных равномерно по внутренней поверхности полиэтиленового корпуса разрядника. Напряжение между зазорами распределяется с помощью резистивных делителей, изготовленных из полос фибры.

Обратный токопровод выполнен в виде металлического цилиндра диаметром 30 см. Рабочей средой разрядника является сухой воздух под давлением около 3 атм.

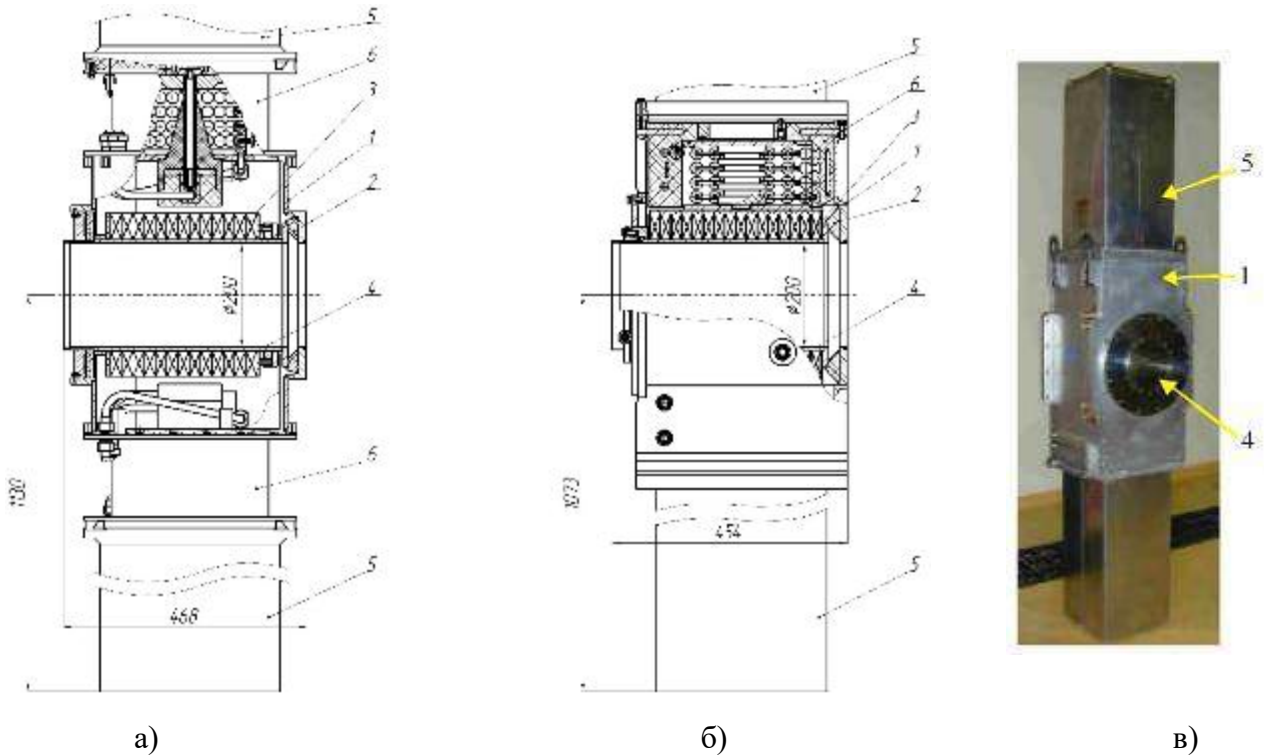


Рисунок 1.2 – Конструкция ступени LTD-02 с масляной изоляцией (а), конструкция ступени LTD-04 с воздушной изоляцией (б) и фотография ступени LTD-04 (в): 1 – корпус ступени; 2 – изолятор; 3 – сердечник; 4 – наружный электрод коаксиальной линии; 5 – конденсатор; 6 – разрядник

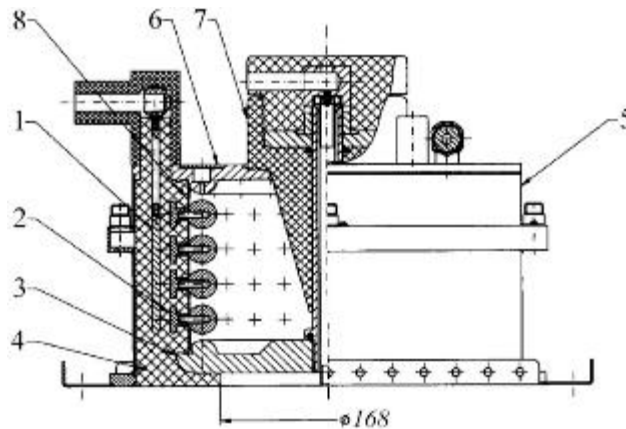


Рисунок 1.3 – Коаксиальный разрядник типа MMCS с рабочим напряжением 90 кВ:  
1 – пусковой электрод; 2 – основание шаровых промежуточных электродов;  
3 – высоковольтный электрод; 4 – полиэтиленовый корпус; 5 – обратный токопровод;  
6 – низковольтный нагрузочный электрод; 7 – изолятор; 8 – резистор из фибры

При испытаниях было обнаружено, что вероятность самопробоя разрядника сильно зависит от проводимости фибровых резисторов. Эта проводимость, в свою очередь, определяется влажностью воздуха и не является стабильной. В связи с этим

вместо фибровых резисторов был использован коронный разряд. Для этого на электродах одного канала установлены иглы, а все остальные электроды каждого ряда связаны между собой шнуром из проводящей резины для равномерного распределения потенциала по зазорам всех каналов.

Запуск разрядника осуществляется изменением потенциала пускового электрода, залитого в полиэтиленовый корпус разрядника вместе с основаниями промежуточных электродов. Изменение потенциала пускового электрода вызывает изменение потенциалов сферических электродов за счет емкостной связи между ними, появление перенапряжения на зазорах разрядника и их пробой. Возможны две схемы запуска. В первой схеме пусковой электрод при зарядке заземлен. Запуск производится подачей на него высоковольтного пускового импульса. Во второй схеме зарядное напряжение подается одновременно на конденсатор и на пусковой электрод. Запуск разрядника осуществляется заземлением пускового электрода. Преимущество второй схемы заключается в отсутствии специального пускового генератора и в более быстром изменении потенциала пускового электрода, что способствует уменьшению времени задержки и разброса момента срабатывания разрядника. Однако изоляция пускового электрода подвержена воздействию квазистатического зарядного напряжения и требования к ней выше, чем в первой схеме. В первой схеме амплитуда пускового импульса не зависит от зарядного напряжения, что дает ей преимущество при низких зарядных напряжениях.

При коротком замыкании изолятора со стороны вакуумного коаксиала индуктивность ступени LTD-02 составляет 17 нГн. Соответственно, индуктивность одной секции – 34 нГн. С учетом емкости секции  $C=5.65$  мкФ временная постоянная  $\sqrt{LC}$  секции ступени LTD-02 составляет 440 нс. При разряде ступени на индуктивную нагрузку 20 нГн, представляющую собой короткозамкнутую выходную коаксиальную линию с диаметром центрального проводника 160 мм, амплитуда тока разряда достигает 800 кА, время нарастания импульса тока около 1 мкс.

Опыт работы уже с первыми ступенями показал трудоемкость сборки и эксплуатации ступени из-за наличия масла в объеме ступени. Поэтому в ступени LTD-04 (рисунок 1.2, б) отказались от использования масляной изоляции. Объемы разрядников и ступени объединили. Сухой воздух с давлением до 3 атм использовался для изоляции как разрядников, так и внутренней полости ступени. Вместо

конденсаторов НАEFELY с параметрами 75 кВ, 5.65 мкФ, 13 нГн, 45 мОм в ступени использованы конденсаторы НАEFELY с параметрами 90 кВ, 3.95 мкФ, 10 нГн, 13 мОм. Для этой ступени был разработан разрядник квадратной формы типа MMSS (рисунок 1.4). В этом разряднике сферические электроды образуют 19 каналов, расположенных по трем сторонам квадрата. Четвертая сторона корпуса используется для изоляции вводов зарядного и пускового напряжения. Такая конструкция позволила уменьшить высоту разрядника почти в 2 раза и снизить индуктивность подводящих шин.

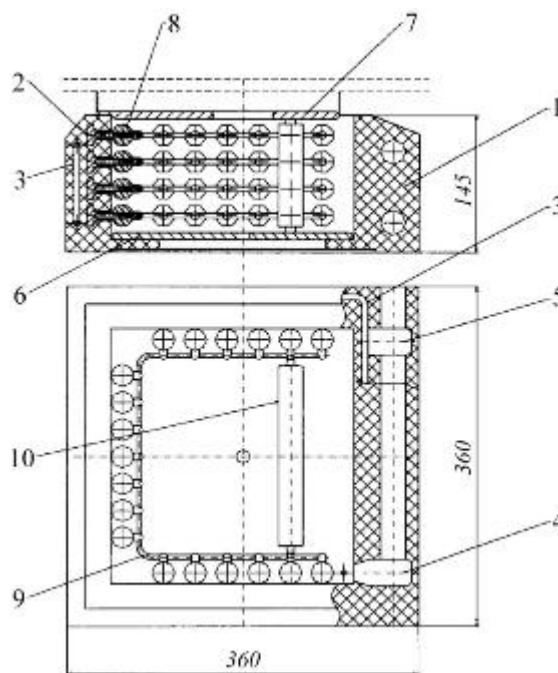


Рисунок 1.4 – Квадратный разрядник типа MMSS: 1 – корпус; 2 – основание шаровых промежуточных электродов; 3 – пусковой электрод; 4 – место подсоединения зарядного кабеля; 5 – место подсоединения пускового кабеля; 6 – высоковольтный электрод; 7 – нагрузочный электрод; 8 – шаровые электроды; 9 – шнур из проводящей резины; 10 – резистивный делитель напряжения

При переходе с масляной на воздушную изоляцию индуктивность секции возросла до 44 нГн. Однако временная постоянная секции  $\sqrt{LC} \approx 420$  нс практически не изменилась, что обусловлено снижением емкости секции. При использовании в выходной линии центрального проводника диаметром 160 мм амплитуда тока короткого замыкания ступени LTD-04 достигла 900 кА, время нарастания импульса тока 950 нс.

Микросекундные ЛТД ступени на основе конденсаторов НАEFELY были использованы в Исследовательском Центре Грама, Франция (CEG) в генераторах ECF1, ECF2 [52-55] и в установке SPHINX [56, 57], предназначенных для генерации мягкого рентгеновского излучения в нагрузках типа Z-пинч с временем сжатия  $\sim 1$  мкс. Для

получения импульсов тока с фронтом  $\sim 100$  нс в этих ЛТД генераторах необходимо использовать ступени обострения мощности, например, индуктивный накопитель с плазменным прерывателем тока [58, 59].

1.2.2 ЛТД ступени с временем нарастания импульса тока  $\sim 0.5$  мкс (субмикросекундные ЛТД ступени)

Промежуточным этапом при переходе к ступеням с временем нарастания импульса тока  $\sim 100$  нс являются ЛТД ступени типа LTD-450 с временем нарастания  $\sim 0.5$  мкс [60, 61]. Конструкция ступени LTD-450 показана на рисунке 1.5. В качестве изоляции внутри ступени используется воздух атмосферного давления. Объем ступени не герметизирован, за исключением объема выходного вакуумного коаксиала (2). Этот коаксиал имеет внешний диаметр 300 мм, внутренний диаметр 260 мм и длину 270 мм. Ступень LTD-450 построена на базе 20 конденсаторов (1) ИК-100-0.17 (0.17 мкФ, 100 кВ, 40 нГн, 850 Дж) производства ПКБ электрогидравлики (Николаев, Украина). Конденсаторы разделены на две половины по 10 штук. В каждой половине конденсаторы крепятся своими выводами на плите (3), подключенной к внешнему проводнику выходного коаксиала. Верхние выводы конденсаторов соединены с электродом (4), к которому подводится зарядное напряжение и который является первым электродом разрядника. Верхние выводы конденсаторов соединены с электродом (4), к которому подводится зарядное напряжение и который является первым электродом разрядника.

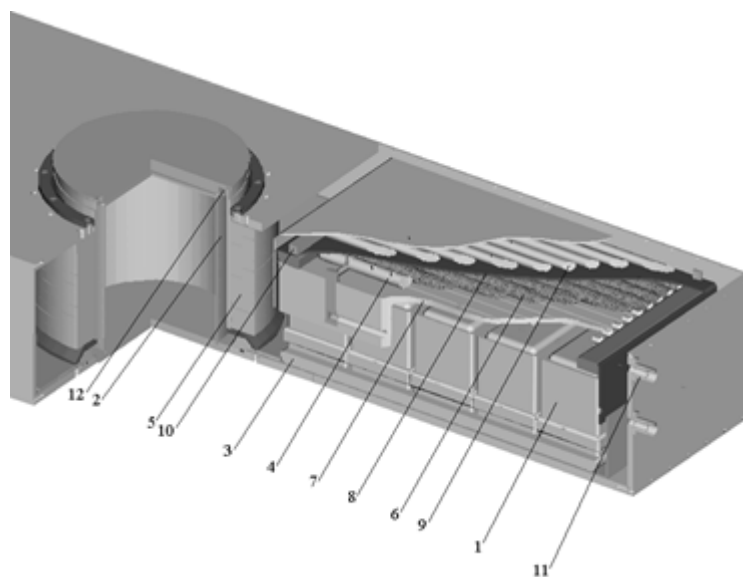


Рисунок 1.5 – Конструкция ступени LTD-450: 1 – конденсаторы; 2 – вакуумный коаксиал ступени; 3, 4 – сборные электроды конденсаторов; 5 – сердечник ступени; 6 – электроды разрядника; 7, 8 – полиэтиленовая изоляция; 9 – электроды пусковой решетки; 10 – изоляторы; 11 – разъем пускового кабеля; 12 – фланец для герметизации объема вакуумного коаксиала

Десять конденсаторов каждой половины разбиты, в свою очередь, на две группы по пять конденсаторов. Каждая из этих групп коммутируется своим многоканальным многозазорным разрядником плоской конфигурации. Объем разрядников не изолирован от остального объема ступени. Для изоляции зазоров в разряднике используется тот же атмосферный воздух. В отличие от ступеней LTD-02 и LTD-04, здесь разрядник подключен к конденсаторам с «земляной» стороны. Это сделано для облегчения условий работы элементов пусковой схемы, поскольку в этом случае пусковой кабель не находится под высоким потенциалом в течение времени вывода энергии из конденсаторов.

Группу из пяти конденсаторов коммутирует многоканальный девятизазорный разрядник планарного типа. Электроды разрядника уложены в пазы, выполненные на верхней поверхности полиэтиленовой изоляции над конденсаторами. Электроды изготовлены в виде цилиндрических пружин с внешним диаметром 22 мм. Собственная индуктивность пружин обеспечивает индуктивную развязку между соседними каналами при зажигании многоканального разряда. Напряжение между зазорами разрядников распределяется с помощью делителя из резисторов номиналом 100 МОм, расположенных внутри цилиндрических пружин. Запуск разрядников осуществляется с помощью пусковой решетки, изолированной от электродов разрядника листом полиэтилена. Схема запуска работает следующим образом. Во время зарядки конденсаторов электроды пусковой решетки за счет емкостных связей с электродами разрядника приобретают некоторые потенциалы того же знака, что и зарядное напряжение. При этом емкости между этими электродами и верхней крышкой корпуса ступени также заряжаются. На первый электрод пусковой решетки подается внешний пусковой импульс длительностью 120 нс, амплитудой 80 кВ и полярностью, противоположной зарядному напряжению. Емкость на землю первого электрода пусковой решетки перезаряжается. Напряжение на зазоре оказывается выше напряжения пробоя и зазор пробивается. Та же картина повторяется со всеми последующими зазорами пусковой решетки. После пробоя последнего зазора пусковой кабель оказывается закороченным на боковую стенку корпуса ступени. Изменение потенциалов электродов пусковой решетки приводит, за счет емкостных связей, к появлению перенапряжения на зазорах разрядника и их пробую. Достоинство этой схемы запуска

состоит в том, что после пробоя последнего зазора пусковой решетки пусковой кабель оказывается заземленным, что снижает требования к его изоляции.

Эквивалентные параметры ступени LTD-450 следующие: емкость  $C=3400$  нФ, индуктивность  $L=11.4$  нГн. Таким образом, временная постоянная  $\sqrt{LC}\approx 200$  нс, что примерно вдвое меньше временной постоянной ступени LTD-04. При работе ступени LTD-450 с зарядным напряжением 90 кВ на индуктивную нагрузку 11 нГн ток разряда нарастает до амплитудного значения 750 кА за время 430 нс.

Ступень LTD-450 можно рассматривать как половину ступени LTD-04, где один конденсатор НАEFELY разделен пополам и каждая половина подключена к выходной линии своими шинами. В итоге, до выходной линии ток течет по двум параллельным ветвям, что обеспечивает двукратное падение индуктивности контура в целом. Таким образом, снижение временной постоянной ступени LTD-450 вдвое в сравнении с временной постоянной ступени LTD-0.4 связано как со снижением емкости накопителя ступени в 2.3 раза, так и индуктивности ступени в 1.9 раза.

Модифицированный вариант ступени LTD-450 с уменьшенным числом конденсаторов ИК-100-0.17 до 8 штук приведен на рисунке 1.6 [62]. Параметры этого варианта ступени:

- максимальное зарядное напряжение 85 кВ;
- емкость ступени 1.36 мкФ;
- максимальная запасаемая энергия 4.9 кДж;
- индуктивность 35 нГн;
- внутренне сопротивление 12.5 мОм;
- временная постоянная 218 нс.

При разряде такой LTD ступени на резистивную нагрузку с сопротивлением 0.3 Ом формируется импульс тока амплитудой 200 кА с фронтом около 500 нс.

Элементная база ступени LTD-450 была успешно использована при создании генераторов тока субмегаамперного и мегаамперного диапазонов с фронтом субмикросекундной длительности для работы с низкоиндуктивными нагрузками. На рисунке 1.7 показан генератор GEP1 в исследовательском центре г. Грама (Франция), предназначенный для проведения экспериментов по изоэнтропическому сжатию [63]. Размеры генератора 6 м × 6 м × 2.5 м. Первичный емкостной накопитель энергии генератора состоит из 28 параллельно включенных секций на основе четырех

конденсаторов ИК-100-0.17. Секция аналогична половине модифицированному варианту ступени LTD-450. Суммарное число конденсаторов в емкостном накопителе 112 шт. Эквивалентная емкость накопителя составляет 19 мкФ, запасаемая энергия ~70 кДж при зарядном напряжении 85 кВ. При использовании пиковых конденсаторов генератор GEPI позволяет получать ток до 4 МА с временем нарастания около 600 нс в индуктивной нагрузке 2.5 нГн.

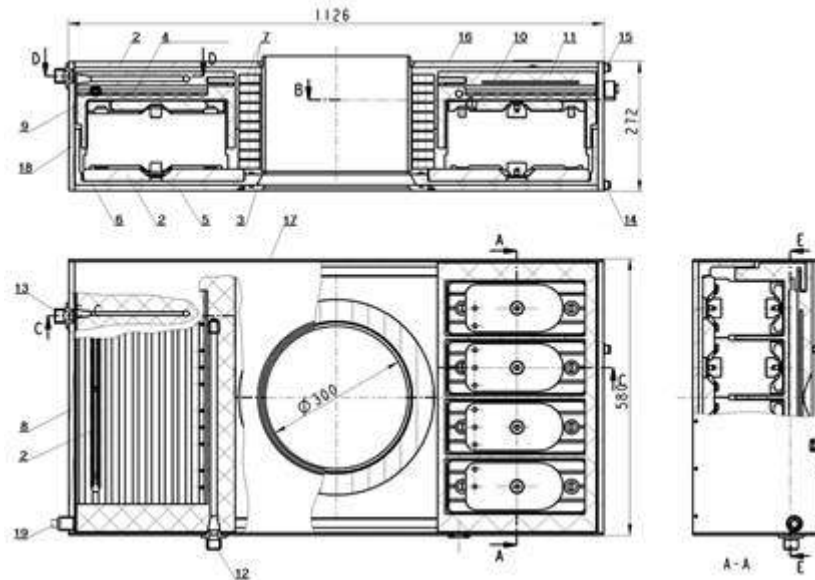


Рисунок 1.6 – Конструкция ЛТД ступени с 8 конденсаторами ИК-100-0.17: 1 – конденсаторы, 2 – плита, 3 – центральная труба, 4 –разрядники, 5 – корпус, 6 – изолятор, 7 – сердечник, 8– электроды разрядника, 9 – полиэтиленовый корпус, 10 – пусковые пластины, 11 – изолятор, 12 – разъемы зарядных кабелей, 13 – разъемы пусковых кабелей, 14 – разъем выходного делителя напряжения, 15 – разъемы пусковых делителей напряжения, 16 –крышка ступени, 17 – боковые стенки, 18 – торцевые стенки, 19 – разъемы делителей зарядного напряжения

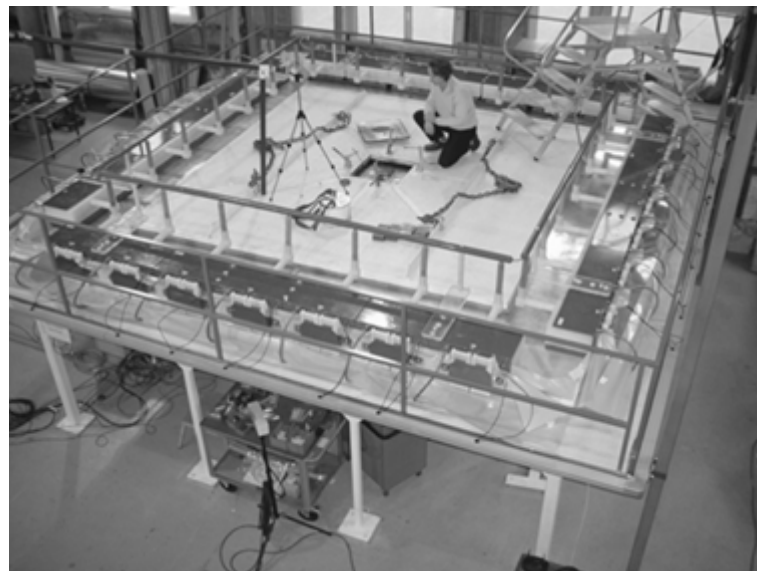


Рисунок 1.7 – Мультимегаамперный генератор GEPI для экспериментов по изоэнтропическому сжатию



Аналогичный генератор с числом секций, уменьшенным с 28 до 16 шт., при зарядном напряжении 80 кВ обеспечивал ток амплитудой  $\sim 1$  МА с временем нарастания  $\sim 500$  нс в индуктивной нагрузке 10.6 нГн [64].

Возможность двукратного уменьшения времени нарастания тока в ЛТД ступени с воздушной изоляцией была продемонстрирована в работе [65]. Также, как и в ЛТД ступени [62], используются восемь конденсаторов ИК100-0.17, но конденсаторы расположены не по двум, а по четырем сторонам квадрата 139 см  $\times$  139 см (рисунок 1.8). Каждая пара конденсаторов коммутируется своим семизазорным двенадцатиканальным разрядником, расположенным в плоскости конденсаторов. Такая компоновка позволила уменьшить высоту ступени с 27 до 15 см, снизить индуктивность и сократить фронт импульса тока.

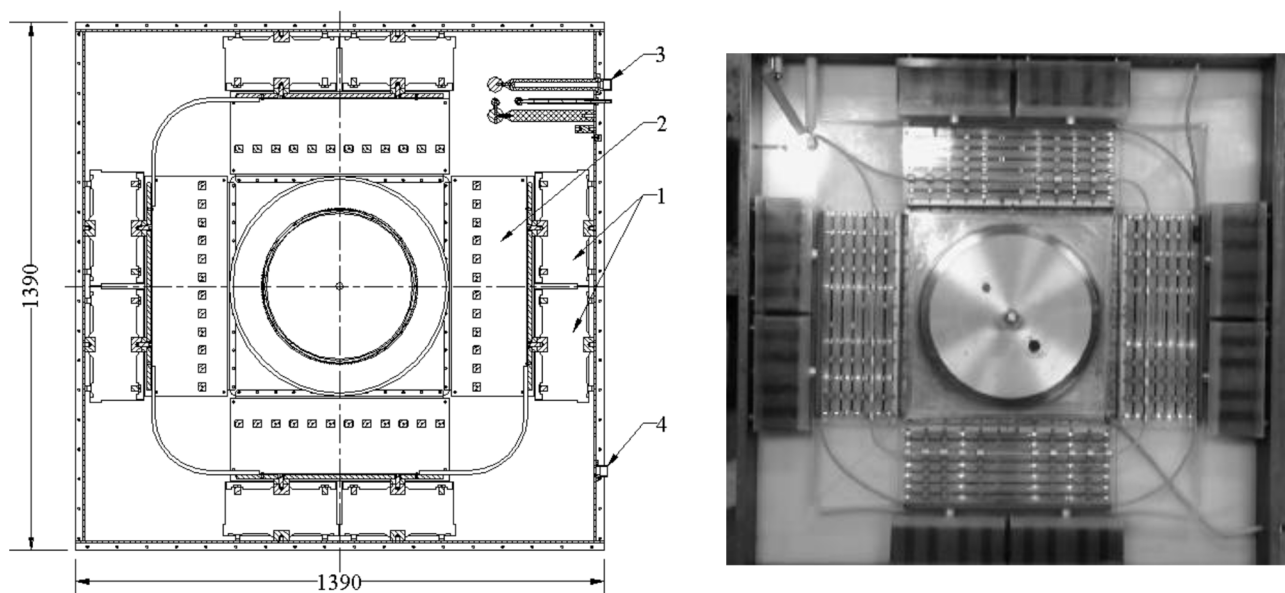


Рисунок 1.8 – Конструкция квадратной ступени из восьми конденсаторов ИК100-0.17

При зарядном напряжении 85 кВ в согласованной нагрузке с сопротивлением 0.15 Ом амплитуда тока разряда ступени составляет 300 кА, время нарастания импульса около 200 нс (рисунок 1.9). Выходная мощность ЛТД ступени достигает 13.5 ГВт, в нагрузку выводится 66 % от запасаемой энергии. Результаты испытаний показали, что из 12 доступных каналов в каждом из разрядников зажигается лишь 6–8 каналов.

К моменту начала работ по теме диссертации эта ступень была наиболее «быстрой» из ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления. Результаты ее эксплуатации показали необходимость пересмотра конструктивного исполнения секций и ступени в целом для повышения рабочего напряжения, реализации устойчивой многоканальной коммутации разрядников, повышения надежности высоковольтной

изоляции и, что особенно важно, реализации возможности извлечения секций без полной разборки ЛТД ступени.

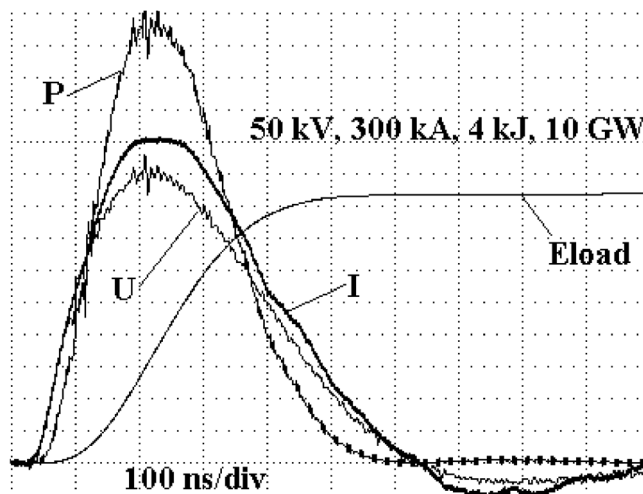


Рисунок 1.9 – Осциллограммы и расчетные кривые тока  $I$ , напряжения  $U$ , выходной мощности  $P$  и энергии  $E_{load}$  при разряде ступени с зарядным напряжением 85 кВ на нагрузку 0.15 Ом

1.2.3 ЛТД ступени с временем нарастания тока  $\sim 100$  нс («быстрые» ЛТД ступени)

Из опыта работ с микросекундными и субмикросекундными ЛТД ступенями следует, что для создания более быстрого емкостного накопителя целесообразно использовать в секциях конденсаторы с меньшей емкостью и включать эти секции на нагрузку параллельными шинами. Временная постоянная секции менее 100 нс впервые была реализована в маслонаполненной ступени LTD-100, в которой были использованы конденсаторы с емкостью 40 нФ (рисунок 1.10) [66]. Ступень содержит 18 конденсаторов Maxwell 31165 (100 кВ, 40 нФ, 25 нГн, 270 мОм), разбитых на 9 идентичных секций (1). Конденсаторы каждой пары заряжаются разнополярно до напряжения  $\pm 100$  кВ. Газовый искровой разрядник (2) подключает конденсаторы пары к нагрузке через токоведущие шины (3). Секция данной ступени представляет собой пару последовательно включенных конденсаторов со своим разрядником и токоведущими шинами. Высоковольтная изоляция обеспечивается полиэтиленовыми изоляторами (4) и заполнением объема ступени трансформаторным маслом. Переход на использование трансформаторного масла вызван стремлением минимизировать индуктивность разрядного контура путем уменьшения расстояния между проводниками без снижения уровня рабочего напряжения и потери надежности работы.

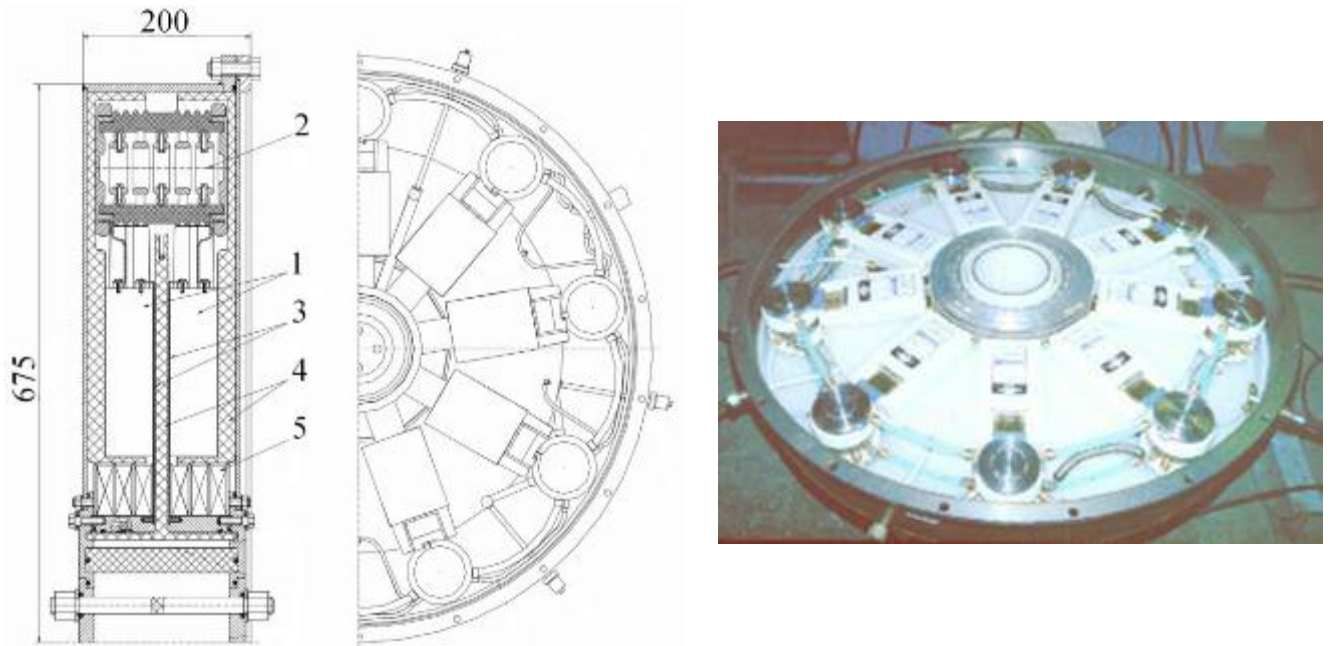


Рисунок 1.10 – Ступень LTD-100: 1 – конденсаторы, 2 – разрядник, 3 – токоведущие шины, 4 – изоляторы, 5 – ферромагнитный сердечник

Конструкция разрядника ступени аналогична разряднику генераторов Маркса [67] (рисунок 1.11). Рабочая среда внутри разрядника – сухой воздух с давлением до 4 атм. Высокое напряжение прикладывается к боковым фланцам, которые герметично закрывают капролоновый цилиндрический корпус разрядника. Внутри разрядника установлены пять промежуточных электродов. Весь разрядный промежуток разделен на шесть зазоров длиной по 6 мм. Зарядное напряжение равномерно распределяется по зазорам с помощью коронного разряда с отрицательных острий. Коронирующие острия расположены по оси разрядника на промежуточных электродах и на одном из боковых фланцев. При двусторонней зарядке средний промежуточный электрод разрядника имеет нулевой потенциал. Запуск разрядника осуществляется подачей пускового импульса на этот электрод. В случае положительной полярности пускового импульса разность потенциалов на отрицательной половине разрядника возрастает, что приводит к ее пробое. Затем пробивается положительная половина разрядника. Исследование в работе [63] с помощью покадровой фотосъемки с длительностью экспозиции 10 нс показало формирование нескольких параллельных искровых каналов в каждом из шести его зазоров. Оценочная индуктивность такого разрядника 115 нГн.

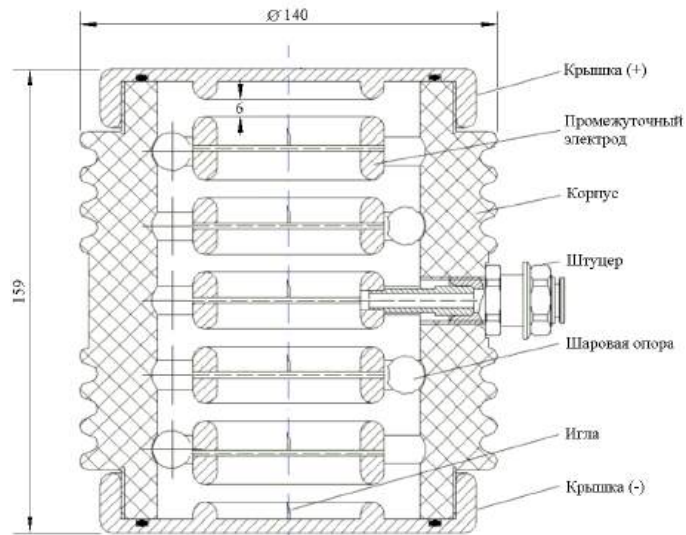


Рисунок 1.11 – Разрядник ИСЭ с рабочим напряжением до  $\pm 100$  кВ для ЛТД ступеней с масляной изоляцией

Возможно исполнение разрядника в трехэлектродной геометрии и, соответственно, с двумя рабочими зазорами. В работах [68, 69] представлены результаты испытаний нескольких трехэлектродных газовых разрядников, разработанных в коллаборации Sandia National Laboratories и нескольких коммерческих компаний США. В трехэлектродных вариантах разрядника достигнуто снижение индуктивности разрядников до величины менее 100 нГн за счет увеличения в несколько раз давления воздуха внутри разрядника и уменьшения длины разрядного промежутка.

Эквивалентные параметры ступени ЛТД-100 следующие: емкость  $C=180$  нФ, индуктивность  $L\approx 30$  нГн, волновое сопротивление  $\sqrt{L/C}\approx 0.4$  Ом. Параметры секции ступени LTD-100: емкость  $C=20$  нФ, индуктивность  $L\approx 260$  нГн, временная постоянная  $\sqrt{LC}\approx 70$  нс. Значительное снижение постоянной времени реализовано главным образом за счет уменьшения емкости секций. При работе ступени с зарядным напряжением  $\pm 100$  кВ на резистивную нагрузку  $\sim 0.4$  Ом амплитуда тока составляет около 200 кА, время нарастания импульса тока  $\sim 100$  нс.

Так как, в первом приближении, временная постоянная разряда ступени определяется временной постоянной единичной секции, то, увеличивая число параллельных секций, можно наращивать энергозапас и мощность ЛТД ступени, не изменяя существенно время вывода энергии из накопителя. Была создана серия ЛТД ступеней с различными энергозапасом и мощностью на основе секций, подобных изображенной на рисунке 1.10. Самая мощная ступень такого типа LTDZ (рисунок 1.12)

[70] и ее полный аналог ступень MAIZE [71, 72] содержат 40 секций из двух конденсаторов емкостью 40 нФ с зарядным напряжением 100 кВ. Индуктивность такой ступени с учетом индуктивности всех конденсаторов, разрядников и токоведущих шин составляет около 8 нГн. Амплитуда тока ступени превышает 1 МА, пиковая мощность ~0.1 ТВт. Внешний диаметр ступени 3 м, высота ступени 22 см. В качестве изоляции внутри ступени также используется трансформаторное масло.

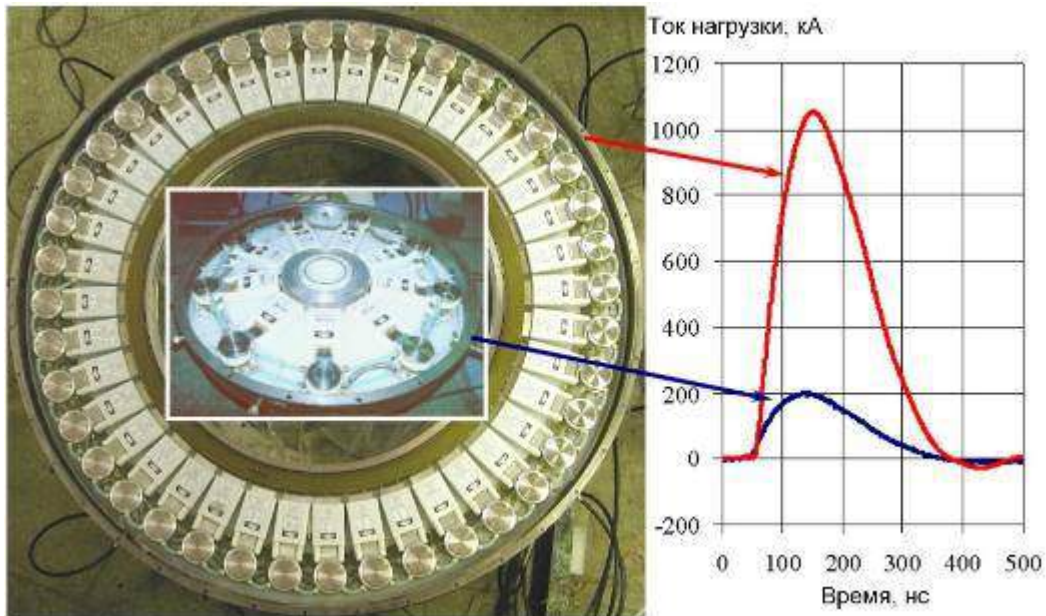


Рисунок 1.12 – Фотографии ступеней LTD-100 и LTDZ (слева) и сравнение выходных импульсов тока этих ступеней (справа) [24]

Подход к снижению временной постоянной ступени, основанный на уменьшении емкости конденсаторов секции, был развит в ЛТД ступенях LTD-100R [32] и LTD-16-8 [73].

Конструкция ступени LTD-100R в основном совпадает с конструкцией ступени LTD-100. Ступень LTD-100R содержит 20 конденсаторов GA 35389 емкостью 21 нФ, разбитых на 10 идентичных секций. Общая емкость ступени 100 нФ. Помимо уменьшения в 2 раза емкости секции по сравнению с LTD-100, уменьшена длина и увеличена ширина токоведущих шин от конденсаторов к нагрузке, изменена форма центрального изолятора. Использование в секциях конденсаторов с малой емкостью, наряду с более плотной компоновкой секции, позволило получить временную постоянную ступени  $\sqrt{LC} \approx 50$  нс. При разряде ступени на резистивную нагрузку ~0.5 Ом реализуется пиковая мощность около 19 ГВт, ширина импульса напряжения на уровне 80 % от максимума 65 нс. В случае использования в ступени пяти пиковых

конденсаторов емкостью 1.7 нФ выходная мощность увеличивается на 25 %, а ширина импульса напряжения на уровне 80% от максимума уменьшается до 45 нс.

Емкостной накопитель ступени LTD-16-8 состоит из 16 пар конденсаторов GA35436 со сниженной до 8 нФ емкостью. Эквивалентные параметры ступени LTD-100 следующие: емкость  $C=64$  нФ, индуктивность  $L\approx 15$  нГн, волновое сопротивление  $\sqrt{L/C}\approx 0.5$  Ом. Параметры секции ступени: емкость  $C=4$  нФ, индуктивность  $L\approx 240$  нГн; следовательно, временная постоянная  $\sqrt{LC}$  снизилась до 30 нс [74]. Ступень позволяет получать на согласованной нагрузке импульс мощностью 20 ГВт при токе 200 кА, нарастающий за время 40 нс. Длительность импульса напряжения на полувысоте 75 нс.

Следует отметить, что наряду с масляной и воздушной изоляцией атмосферного давления исследуется возможность использования в качестве изоляции внутри ступени элегаза ( $\text{SF}_6$ ) или его смеси при атмосферном или повышенном давлении [74-76, 29]. Например, ступень LTD-16-8 испытывалась с газовой изоляцией в смесях сухого воздуха с элегазом при давлении до 6 атм (рисунок 1.13).

В ступени, изображенной на рисунке 1.14, в качестве изоляции используется элегаз при давлении 1.5–2 атм. Ступень содержит 23 секции, каждая из которых включает два последовательно включенных конденсатора емкостью 100 нФ. Конденсаторы секции заряжаются разнополярно до напряжения  $\pm 100$  кВ. При разряде ступени на резистивную нагрузку 0.08 Ом реализуется импульс тока амплитудой  $\sim 1$  МА с временем нарастания 115 нс.

В следующей ступени (рисунок 1.15) для изоляции используется смесь элегаза с азотом при атмосферном давлении. Ступень содержит 32 секции, каждая из них также включает два последовательно включенных конденсатора 100 нФ, заряжаемых разнополярно. При разряде ступени с зарядным напряжением  $\pm 90$  кВ на резистивную нагрузку 0.09 Ом реализуется импульс тока амплитудой  $\sim 1$  МА с временем нарастания 124 нс и длительностью на полувысоте 312 нс.

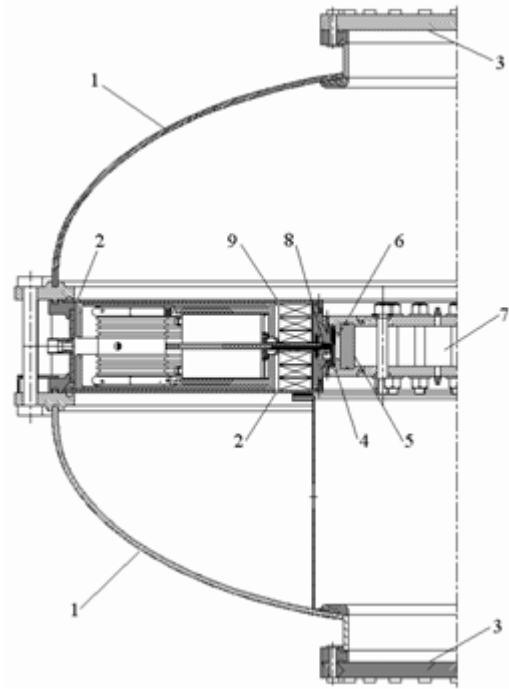


Рисунок 1.13 – Ступень LTD-16-8 при испытаниях с газовой изоляцией [74]:  
 1 – эллиптические крышки, 2 – отверстия во фланцах индуктора, 3 – торцевой фланец верхней эллиптической крышки, 4 – Т-образный изолятор, 5 – полиэтиленовое кольцо, 6 – нагрузка в виде кольцевой полости, залитой водным раствором KBr, 7 – полость, заполненная элегазом, 8 – пояс Роговского, 9 – магнитный зонд

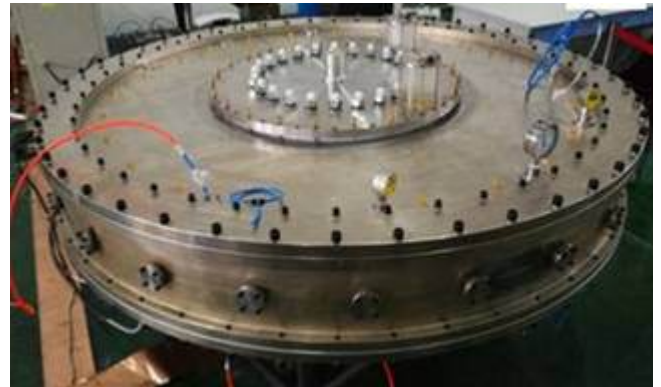
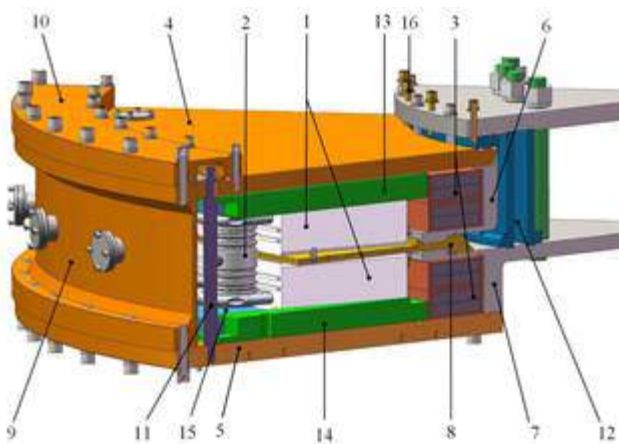


Рисунок 1.14 – Прототип ЛТД ступени с 32 секциями для установки CZ34 (Китай) [75]:  
 1 – конденсаторы емкостью 100 нФ; 2 – газовые разрядники; 3 – сердечник; 4, 5 – верхняя и нижняя крышки корпуса ступени; 6, 7 – верхний и нижний высоковольтные электроды; 8 – проходной изолятор; 9 – корпус ступени; 10 – прижимной фланец; 11 – металлические стержни; 12 – нагрузка; 13, 14 – верхний и нижний изоляторы; 15 – изолирующие пластины; 16 – винты

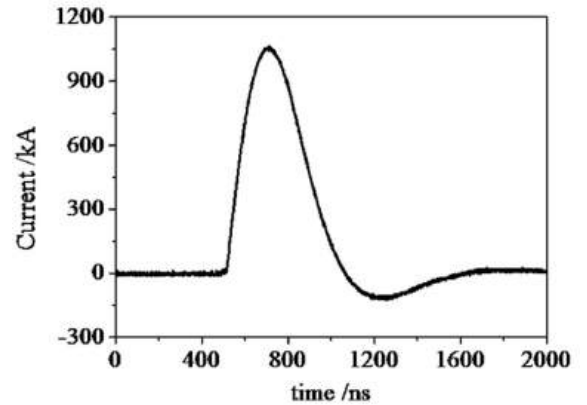


Рисунок 1.15 – Слева: ступень с 32 секциями для модуля М-50 мультимегамперной ЛТД установки (Китай). Справа: осциллограмма тока ступени на согласованной нагрузке 0.09 Ом [76]

### 1.3 ЛТД генераторы

Как уже было отмечено во Введении, использование ЛТД генераторы нужны, прежде всего там, где требуется высокая пиковая мощность. Обзор таких направлений в физике высоких плотностей энергии приведен в работе [77]. В настоящее время активно прорабатываются проекты генераторов сверхмощных импульсов уровня  $\sim 1\ 000$  ТВт, способных ввести в низкоиндуктивную нагрузку типа Z-пинч ток более 50 МА за время  $\sim 100$  нс [26, 78]. ЛТД технология рассматривается как один из наиболее перспективных подходов к созданию таких генераторов, в том числе для исследования УТС на Z-пинчах [27-29, 79]. В качестве промежуточного этапа на пути создания ЛТД генератора с током более 50 МА и уровнем мощности порядка 1 ПВт, рассматриваются проекты генераторов с током 5 МА (Китай) [80-82], с током 12.5 МА и мощностью 15 ТВт (США) [83], с током 14 МА и мощностью 31 ТВт (США) [84, 85], с током более 30 МА (СЗ30, Китай) [30].

Представление о масштабах установки петаваттного класса мощности на основе ЛТД технологии дает проект Z-800 [28]. Первичный емкостной накопитель установки Z-800 состоит из 90 параллельно включенных модулей. Каждый модуль состоит из 60 последовательно включенных масляных ЛТД ступеней. Каждая ступень содержит 30 параллельных секций из двух последовательно включенных конденсаторов (80 нФ, 100 кВ) и искрового разрядника. Диаметр каждой ступени – 2.5 м, высота – 0.22 м. Диаметр всей установки 52 м. Суммарное число ЛТД ступеней в генераторе – 5 400. Суммарное



число разрядников – 162 000. Запасаемая энергия в емкостном накопителе – 130 МДж. По оценкам, такой генератор сформирует импульс мощности 890 ТВт и обеспечит ток амплитудой 65 МА с временем нарастания 113 нс в лайнерной нагрузке с индуктивностью в конце сжатия около 5 нГн.

Существующие ЛТД установки далеки от указанных выше параметров. Самой крупной является микросекундная ЛТД установка проекта SPHINX во Франции (рисунок 1.16) [56, 57, 86]. Проектный состав установки SPHINX – 16 модулей, каждый из которых содержит 10 ступеней, аналогичных ступени LTD-04. Таким образом, проектное суммарное число ЛТД ступеней составляет 160. Энергия от модулей подводится к нагрузке по вакуумным коаксиальным передающим линиям с соотношением диаметров внешнего и центрального проводников 200 мм / 163 мм. Диаметр установки составляет 16 м, высота – 3 м. До мая 2004 года установка была запущена в составе 96 ЛТД ступеней, разбитых на 12 модулей по 8 ступеней в каждом. В этой конфигурации установка эксплуатировалась при зарядном напряжении 50 кВ и обеспечивала импульс ток амплитудой 5.2 МА с временем нарастания 1.2 мкс в индуктивной нагрузке 5.5 нГн или 4 МА с фронтом 700 нс в проволочной алюминиевой лайнерной нагрузке. К середине 2006 года была выполнена модернизация ЛТД ступеней с целью увеличения рабочего зарядного напряжения до 70 кВ. Конфигурация установки также претерпела изменения: число ступеней увеличено до 128, число модулей увеличено до 16, число ступеней в каждом модуле не изменилось (8). Изменения позволили увеличить запасаемую энергию, которая составила 2 МДж при зарядном напряжении 60 кВ и увеличить ток в проволочной лайнерной нагрузке до 5 МА (рисунок 1.17). Опыт эксплуатации SPHINX подтверждает преимущества ЛТД технологии при создании крупных модульных установок, а именно гибкость в изменении конфигурации как по числу модулей, так и по составу модулей. Кроме того, демонстрируется, что использование воздуха атмосферного давления в качестве изоляции положительно сказывается на стоимости генератора.



Рисунок 1.16 – Микросекундная ЛТД установка SPHINX в Исследовательском Центре Грама, Франция

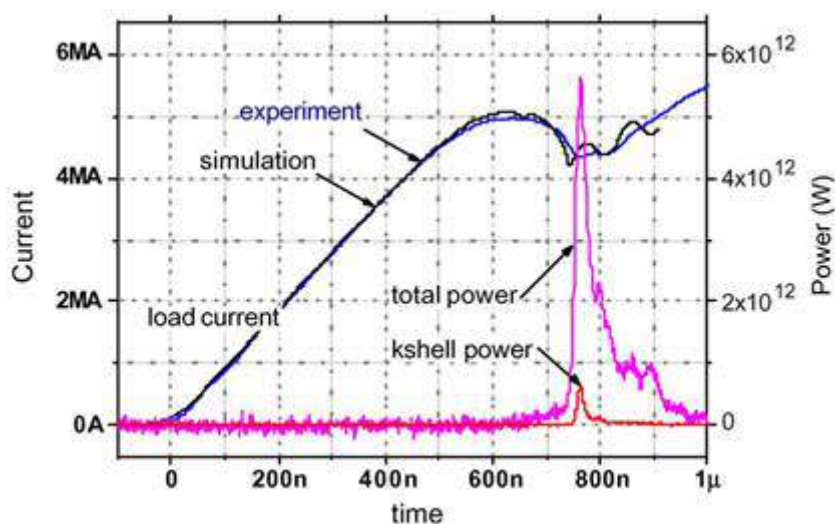


Рисунок 1.17 – Ток установки SPHINX в проволочной лайнерной нагрузке и мощность генерируемого рентгеновского излучения [57]

Второй помимо SPHINX ЛТД установкой в составе нескольких модулей, созданной к началу работы над диссертацией, является электронный ускоритель широкоапертурного электронного пучка для накачки активной газовой среды эксимерного лазера, созданный в ИСЭ СО РАН [62, 87, 88]. Использование ЛТД генераторов для формирования широкоапертурных сильноточных пучков является альтернативой схемам с промежуточными накопителями в виде водяных линий [89–91] или схемам прямого действия на основе генераторов Аркадьева–Маркса [92].

Внешний вид ускорителя электронов на основе ЛТД генератора для накачки ХеСl-лазера с объемом активной среды 200 л показан на рисунке 1.18. Импульс

напряжения на вакуумном диоде формируется с помощью ЛТД генератора в составе двух параллельно включенных модулей. Каждый модуль состоит из 10 последовательно включенных ЛТД ступеней (см. подраздел 1.2.2, рисунок 1.5) [62]. При зарядном напряжении 85 кВ на электронном диоде с сопротивлением 1.5 Ом получается напряжение 500 кВ при суммарном токе от двух модулей около 300 кА (рисунок 1.19). Длительность импульса на полувывоте составляет 500 нс. В накопителях ступеней запасается энергия 98 кДж. В диод передается энергия 85 кДж с пиковой мощностью 175 ГВт. Энергия, вкладываемая в газ электронным пучком, составляет 19 кДж. Эффективность передачи энергии от первичного накопителя в газ около 20 %, что близко к эффективности традиционных ускорителей.

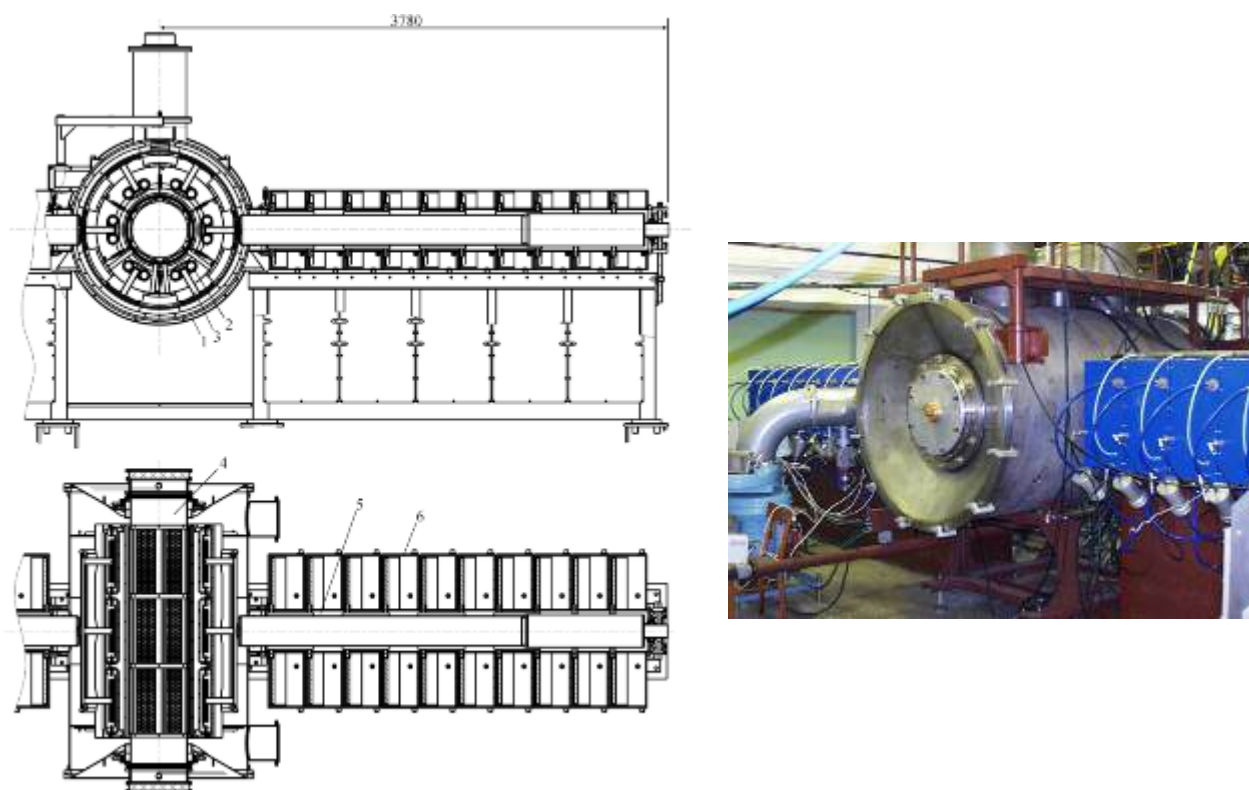


Рисунок 1.18 – Ускоритель электронов с радиально сходящимся электронным пучком на основе ЛТД генератора: 1 – вакуумная камера; 2 – катоды; 3 – катододержатели; 4 – кювета; 5 – вакуумная линия; 6 – ЛТД ступени

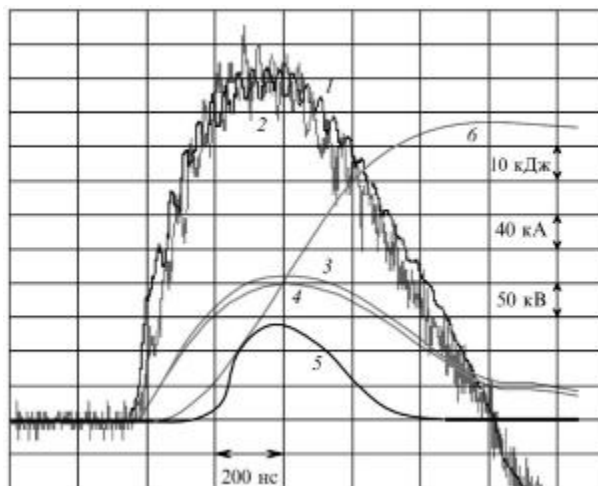


Рисунок 1.19 – Осциллограммы импульсов напряжения (1, 2) и тока (3, 4) каждого из двух модулей ЛТД генератора, импульса излучения лазера (5) и энергии в диоде (6)

Дальнейший прогресс в развитии сильноточных ускорителей связан с увеличением мощности ЛТД генераторов за счет сокращения длительности формируемого импульса. Снижение длительности импульса позволяет упростить задачу получения широкоапертурного электронного пучка, снизить вероятность пробоя элементов ускорителя и диода.

В приведенных выше установках выходное напряжение ЛТД модулей составляет около 0.5 МВ. Более высокий уровень выходного напряжения 1–2.5 МВ реализован в одномодульных ЛТД генераторах в составе 7, 10 и 21 последовательно включенных ступеней типа ЛТД-100R [93–96] (рисунок 1.20). Рассматривается возможность реализации ЛТД генератора с выходным напряжением более 5 МВ [97].



Рисунок 1.20 – Ускоритель URSA Minor в составе 21-ой ЛТД ступени с проектным выходным напряжением 2.5 МВ на электронном диоде с сопротивлением 50 Ом [96]

Указанные генераторы предназначены для получения тормозного рентгеновского излучения, в том числе для целей импульсной радиографии, и рассматриваются как

альтернатива “традиционным” IVA генераторам, таким как Hermes III [43], Sabre [98], RITS [99], Cygnus [100] и др. Во всех этих IVA генераторах питание к индукторам подводится сходным образом. Генератор Маркса заряжает промежуточный водяной накопитель, который с помощью управляемого выходного разрядника разряжается на несколько параллельных водяных формирующих линий. Эти линии с помощью неуправляемых разрядников коммутируются на индукционную систему. Такая технология доказала свою жизнеспособность. Основными ее недостатками являются сложность конструкции и высокая стоимость. Использование ЛТД технологии и реализация ЛТД ступеней с фронтом импульса менее 100 нс призваны исключить формирующие линии с жидким диэлектриком из состава ускорителей. При этом задача получения квазипрямоугольного выходного импульса напряжения решается за счет формирования в ЛТД ступени двух и более разрядных контуров с разной частотой колебаний (применение в одной ступени секций с разными временными постоянными) [101–104].

Последовательное включение ЛТД ступеней с мегаамперным уровнем тока впервые представлено в работах [70, 105]. Был запущен модуль из пяти мегаамперных ступеней с масляной изоляцией и вакуумной выходной линией (рисунок 1.21). Модуль испытан с нагрузкой в виде вакуумного электронного диода с сопротивлением около 0.5 Ом. В испытаниях напряжение на диоде составило 400 кВ, ток пучка электронов 800 кА, длительность импульса на полувысоте 200 нс, выходная мощность 320 ГВт.



Рисунок 1.21 – Модуль из пяти 1 МА ЛТД ступеней с масляной изоляцией

В Китае в 2020 г. было проведено испытание модуля М-50-1 из десяти мегаамперных ЛТД ступеней (рисунок 1.22), являющимся прототипом полноразмерного модуля М-50 из пятидесяти ступеней для проекта шестидесяти-модульной ЛТД установки с током около 50 МА [29, 76]. Выходные параметры модуля М-50-1 с нагрузкой в виде вакуумного электронного диода: амплитуда тока 0.91 МА, амплитуда напряжения 0.83 МВ, время нарастания импульса 130 нс, выходная мощность 0.75 ТВт.



Рисунок 1.22 – Модуль М-50-1 (Китай) из 10 ЛТД ступеней с мегаамперным уровнем тока

#### 1.4 Выводы

ЛТД технология позволяет формировать мощные электрические импульсы длительностью порядка 100 нс без использования промежуточных ступеней повышения мощности. Поскольку ко всем разрядникам ЛТД генератора можно подвести пусковые кабели и осуществить управляемый запуск всех ЛТД ступеней, такой генератор способен работать в режиме индукционного сумматора напряжения (IVA режим).

Для реализации большой амплитуды тока ( $\sim 1$  МА) и малой длительности импульса ( $\sim 100$  нс) в ЛТД ступени необходимо использовать большое число секций с малой емкостью ( $\leq 100$  нФ), что сильно увеличивает число элементов конструкции (прежде всего разрядников). Поэтому существенно повышаются требования к надежности элементной базы и конструктивному исполнению ЛТД генератора.

Актуальны задачи одновременного срабатывания всех разрядников в каждой отдельной ЛТД ступени и поиска конструктивного исполнения ЛТД генератора, допускающего сравнительно простое обслуживание, проведение ремонтных и профилактических работ.

К началу работы над диссертацией созданы секции емкостных накопителей с зарядным напряжением  $\pm 100$  кВ, обеспечивающие время вывода энергии в нагрузку порядка 100 нс. Созданы ЛТД ступени с зарядным напряжением  $\pm 100$  кВ и генераторы на их основе с временем вывода энергии в нагрузку порядка 100 нс. В этих ЛТД ступенях используются изолированные трансформаторным маслом идентичные секции, которые состоят из конденсаторов малой емкости в пластиковом корпусе и искрового разрядника, работающего в сухом воздухе при повышенном давлении. Использование масляной изоляции приводит к необходимости практически полной разборки генератора для ремонта любой его ЛТД ступени.

Значительное улучшение эксплуатационных свойств ЛТД генераторов может быть достигнуто за счет использования воздуха атмосферного давления в изоляции ступени и рабочей среды разрядников. В отличие от других газов или смесей воздух не токсичен, не требует дополнительных резервуаров для хранения, бесплатный. Воздух атмосферного давления успешно использован в качестве изоляции в ЛТД генераторах с зарядным напряжением до 90 кВ, длительностью фронта импульса от нескольких сотен наносекунд до микросекунды. Однако, в этих генераторах не было реализовано одно из преимуществ использования воздуха в изоляции ЛТД ступеней, а именно возможность доступа к элементам емкостного накопителя без полной разборки генератора.

Дальнейшее развитие ЛТД генераторов, изолированных воздухом атмосферного давления, связано со снижением длительности импульса и увеличением выходной мощности при сохранении уровня запасаемой энергии в первичном емкостном накопителе. Опыт создания ЛТД ступеней с масляной изоляцией убедительно демонстрирует возможность уменьшения времени вывода энергии в нагрузку за счет снижения емкости используемых конденсаторов. Однако в случае отказа от масляной изоляции и использования воздуха атмосферного давления требуются:

- иные технические решения по обеспечению достаточной электрической прочности поверхности конденсаторов и разрядников при уровне зарядного напряжения 100 кВ без значительного увеличения индуктивности разрядного контура;
- создание малогабаритных низкоиндуктивных искровых разрядников, надежно

работающих без повышенного давления рабочего газа;

– иные конструкторские исполнения ЛТД секций и ЛТД ступеней, обеспечивающие ремонт и обслуживание емкостного накопителя без полной разборки всего генератора;

– апробация последовательного включения мегаамперных ЛТД ступеней в модуле.

Следует заметить, что несмотря на авторство и лидирующие позиции России в ЛТД технологии, все работы по проектам мощных мультимегаамперных ЛТД установок до недавнего времени велись в США и Китае. Для сохранения приоритета России в данном направлении актуальны исследовательские работы по совершенствованию элементной базы и увеличению мощности ЛТД генераторов.



## **2 Многозазорный многоканальный разрядник атмосферного давления с рабочим напряжением до 100 кВ для секций ЛТД ступеней с временем вывода энергии порядка 100 нс**

### **2.1 Конструкция разрядника**

Отличительной особенностью ЛТД технологии является большое число разрядников. В проектируемых ЛТД генераторах петаваттного уровня мощности число разрядников может составлять порядка  $10^4$  шт. [26, 28, 29]. Поэтому их исследованиям уделяется особое внимание [68, 69, 106–108].

Широкий диапазон рабочего напряжения, быстродействие и наносекундная стабильность запуска реализуются в многозазорных искровых разрядниках [109]. Для таких разрядников снижаются требования к амплитуде пускового напряжения и, соответственно, к пусковому генератору. Для уменьшения индуктивности, увеличения пропускаемого заряда и снижения потерь энергии на коммутацию предпочтителен режим с параллельными искровыми каналами – режим многоканальной коммутации [110]. Изложенные соображения привели к тому, что при разработке низкоиндуктивного разрядника с рабочим напряжением до 100 кВ сделан выбор в пользу многозазорной многоканальной конфигурации, принципы которой изложены в работах [106, 111–113].

Фотография и конструкция двух вариантов искрового разрядника, работающего в воздухе атмосферного давления и разработанного для секций ЛТД ступеней с воздушной изоляцией с зарядным напряжением до 100 кВ [114–117] показаны на рисунках 2.1 и 2.2. Разрядник имеет планарную геометрию, которая позволяет минимизировать расстояние между искровыми каналами и обратным токопроводом и, соответственно, индуктивность, а также выгодна для проектирования ЛТД ступеней с малой высотой в осевом направлении.

Корпус разрядника (1) выполнен из компаунда на основе эпоксидной смолы и кварцевой пудры. В компаунд залиты детали (2), на которых закрепляются электроды разрядника (3). Семь зазоров в разряднике образованы шестью рядами сферических электродов (3) диаметром 22 мм. Материал электродов – нержавеющая сталь, либо сталь

ШХ-20 с покрытием нитридом титана. Длина единичного зазора составляет 6 мм, суммарная длина зазора между высоковольтным и земляным электродами – 42 мм.

В первом варианте разрядника (рисунок 2.1) крайние высоковольтный и низковольтный электроды (6) имеют форму цилиндров диаметром 22 мм. Электроды изготовлены из дюралюминия Д16Т. Размеры разрядника в этом варианте исполнения: 298 мм × 220 мм × 50 мм. Напряжение по электродам разрядника распределяется с помощью резистивного делителя напряжения (5), собранного из резисторов Р-1-35-4 (ЗАО «РЕОМ», г. Санкт-Петербург) номиналом 68 МОм. Эти резисторы соединяются последовательно в одном канале между высоковольтным и низковольтным электродами. Через детали (2) параллельно высоковольтному и низковольтному электроду пропущены шнуры (6) из проводящей резины, с помощью которых обеспечивается распределение напряжения по электродам во всех остальных каналах. Сопротивление резины между соседними каналами одного ряда  $\approx 0.7$  МОм. Резистивные элементы залиты внутри корпуса разрядника, благодаря чему исключается электрический пробой вдоль их поверхности.

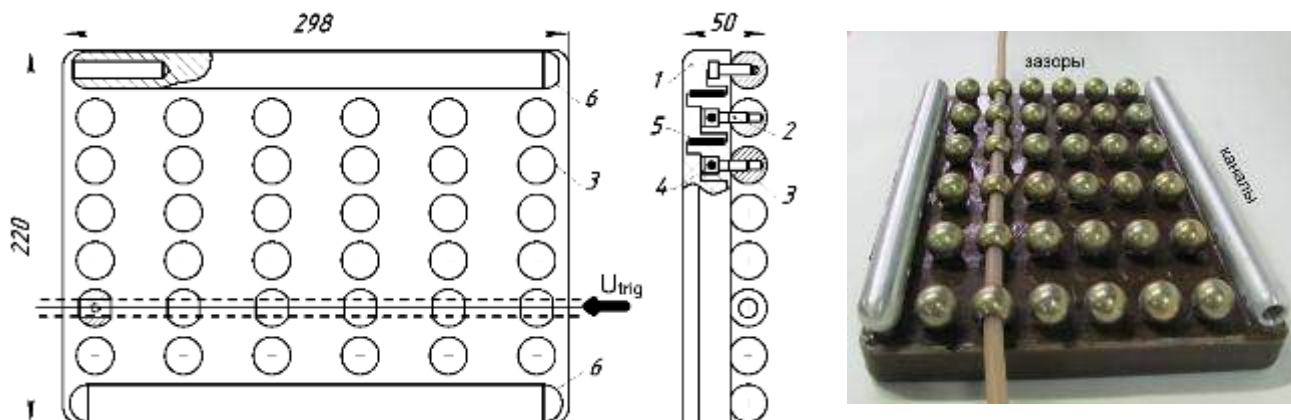


Рисунок 2.1 – Первый вариант разрядника: 1 – корпус разрядника; 2 – детали для крепления электродов; 3 – электроды разрядника; 4 – шнуры из проводящей резины; 5 – резистивный делитель напряжения; 6 – высоковольтный и низковольтный концевые электроды

Второй вариант разрядника (рисунок 2.2) отличается меньшими габаритными размерами. В нем крайние высоковольтный и низковольтный электроды отсутствуют. Их роль выполняют плоские сборные электроды со стороны емкостного накопителя энергии и низковольтной стороны. За счет этого длина разрядника уменьшена на 42 мм (с 220 мм до 178 мм). Также в этом варианте уменьшено на 6 мм расстояние между электродами соседних каналов, за счет чего уменьшена ширина разрядника с 298 мм до 264 мм. Напряжение по электродам разрядника распределяется с помощью резистивного

делителя напряжения (5), собранного из резисторов VR68 (Vishay Intertechnology) номиналом 68 МОм. Эти резисторы соединяются последовательно в двух каналах между высоковольтным и низковольтным электродами. Между электродами одного зазора соседних каналов вместо шнуров из проводящей резины использованы спирали с внешним диаметром 6 мм. Спирали выполнены из нержавеющей стали диаметром 0.5 мм. Индуктивность спирали между соседними электродами  $\approx 0.9$  мкГн, сопротивление  $\approx 2$  Ом. Указанные изменения позволили улучшить равномерность распределения напряжения по электродам разрядника.

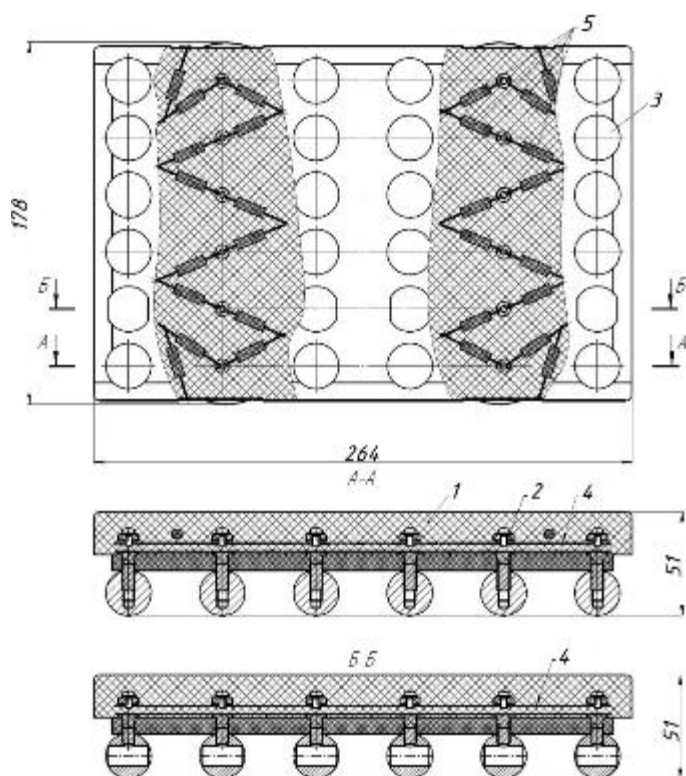


Рисунок 2.2 – Вариант разрядника с уменьшенной длиной: 1 – корпус разрядника; 2 – детали для крепления электродов; 3 – электроды разрядника; 4 – спирали из нержавеющей стали; 5 – резистивный делитель напряжения

## 2.2 Схема запуска разрядника

В обоих вариантах разрядника пусковой импульс подается в каждый из каналов на электроды второго ряда относительно низковольтного электрода. Эти электроды имеют сквозные отверстия диаметром 9 мм, через которые проходит пусковой проводник диаметром 1.5–3 мм в полиэтиленовой изоляции (см. фотографию на рисунке 2.1). Развязка основного разрядного контура и пусковой цепи по постоянному

напряжению обеспечивается за счет разделительной емкости между пусковым проводником и электродами второго ряда.

Электрическая схема разрядника в стадии зарядки емкостного накопителя энергии и идеализированная электрическая схема замещения одного канала разрядника для описания процесса запуска показана на рисунке 2.3. Помимо сопротивлений делителя  $R_1=68$  МОм, задающих равномерное распределение зарядного напряжения по зазорам, схема содержит емкость между пусковым проводником и пусковым электродом  $C_1$ , емкости между электродами  $C_2$ , емкости электродов на землю  $C_3$ . Емкости рассчитывались исходя из геометрии канала разрядника, показанной на рисунке 2.4. Оценочные значения емкостей:  $C_1 \approx 2.3$  пФ,  $C_2 \approx 1$  пФ,  $C_3 \approx 1.8$  пФ.

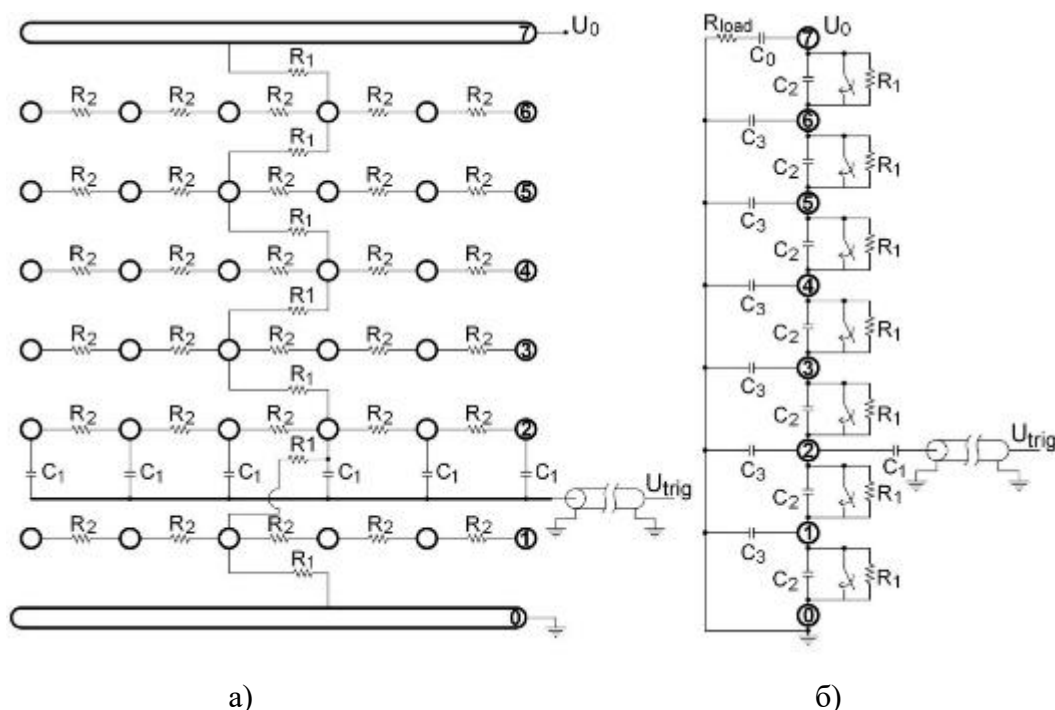


Рисунок 2.3 – Электрическая схема разрядника с резистивной развязкой между каналами в стадии зарядки емкостного накопителя (а) и схема одного канала в стадии запуска разрядника (б):  $C_1 \approx 2.3$  пФ – емкость между пусковым проводником и пусковым электродом;  $C_2 \approx 1$  пФ – межэлектродная емкость;  $C_3 \approx 1.8$  пФ – емкость электрода на землю;  $C_0$  и  $R_{load}$  – емкость накопителя и сопротивление нагрузки, приведенные к одному каналу

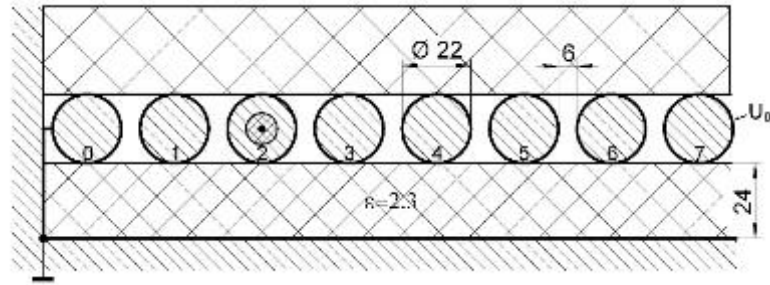


Рисунок 2.4 – Эскиз канала разрядника

В процессе зарядки емкостного накопителя до напряжения  $U_0$  на каждом зазоре разрядника устанавливается разность потенциалов  $U_0/7$ , которая при зарядном напряжении 100 кВ не превышает 14.3 кВ. При этом статическое напряжение самопробоя единичного зазора в воздухе атмосферного давления, определенное экспериментально, составляет 18–19 кВ. Если в разряднике использовать шесть зазоров, то напряжение на одном зазоре составит около 16.7 кВ. Режим работы при 100 кВ для этого случая возможен, но требуется очень точное распределение напряжения по зазорам, а также высокая точность в установке межэлектродных промежутков. Поэтому проще и надежнее использовать разрядник с семью зазорами, несмотря на бóльшие потери энергии в нем по сравнению с шестью зазорами.

В случае пробоя одного из промежутков, напряжение на электродах соседних каналов будет изменяться с временной постоянной перезарядки емкости электродов на землю  $\tau = C_3 \cdot R_2 \sim 1$  мкс, где  $R_2 \approx 0.7$  МОм – сопротивление между электродами одного ряда в соседних каналах. Поскольку  $\tau$  много больше времени пробоя промежутков одного канала, то можно считать каналы гальванически не связанными. Их взаимное влияние может проявляться лишь через взаимную подсветку ионизирующим излучением. Для качественного описания процесса коммутации разрядника можно рассматривать единичный канал, используя схему на рисунке 2.3, б. При этом упрощенно считается, что сопротивление искрового промежутка скачком падает до нулевого значения при превышении разности потенциалов на электродах промежутка значения статического напряжения пробоя.

Перед запуском разрядника разность потенциалов на каждом зазоре  $U_{gap} = U_0/7 = 14.3$  кВ при полном напряжении на разряднике  $U_0 = 100$  кВ. После подачи импульса пускового напряжения  $U_{trig}$  через емкость  $C_1 \approx 2.3$  пФ непосредственно к

пусковым электродам второго ряда прикладывается пусковое напряжение, определяющаяся выражением

$$U_{trig,2} \approx U_{trig} \frac{C_1}{C_1 + C_3 + 2 \cdot C_2} \approx 0.41 \cdot U_{trig}. \quad (2.1)$$

Потенциал от пускового импульса на соседних электродах описывается выражениями [118, 119]:

$$U_{trig,3} = U_{trig,2} \frac{\text{sh}(5 \cdot a)}{\text{sh}(6 \cdot a)} \approx 0.117 \cdot U_{trig}, \quad (2.2)$$

$$U_{trig,4} = U_{trig,2} \frac{\text{sh}(4 \cdot a)}{\text{sh}(6 \cdot a)} \approx 0.033 \cdot U_{trig}, \quad (2.3)$$

$$U_{trig,5} = U_{trig,2} \frac{\text{sh}(3 \cdot a)}{\text{sh}(6 \cdot a)} \approx 0.009 \cdot U_{trig}, \quad (2.4)$$

$$U_{trig,6} = U_{trig,2} \frac{\text{sh}(2 \cdot a)}{\text{sh}(6 \cdot a)} \approx 0.003 \cdot U_{trig}, \quad (2.5)$$

$$U_{trig,1} = U_{trig,2} \frac{\text{sh}(1 \cdot a)}{\text{sh}(2 \cdot a)} \approx 0.108 \cdot U_{trig}, \quad (2.6)$$

где  $a = \ln \left( 1 + \frac{C_1}{2 \cdot C_2} \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{4 \cdot C_2}{C_1} + 1} \right) \right)$ .

Для стабильного запуска и получения хорошей коммутационной характеристики разрядник должен иметь высокое перенапряжение на всех зазорах. Чем это перенапряжение выше, тем лучше. Как следует из анализа распределения напряжения на промежутках разрядника, условия для срабатывания более благоприятны в случае противоположенной полярности зарядного и пускового напряжений. Поэтому при положительной полярности зарядного напряжения емкостного накопителя используется пусковой импульс отрицательной полярности. Помимо требования к полярности пускового импульса необходимо, чтобы межэлектродная емкость  $C_2$  была меньше емкости электродов на землю  $C_3$ . В этом случае основная часть пускового импульса напряжения оказывается приложенной к одному зазору. Обычно стремятся выполнить условие  $C_3/C_2 \geq 5$  [119]. Для геометрии нашего разрядника отношение  $C_3/C_2 \approx 2$ . При  $C_3/C_2 = 2$  пусковой импульс напряжения амплитудой 80 кВ понижает потенциал электрода 2 на 33.1 кВ с +28.6 до -4.5 кВ (рисунок 2.5, кривая 3). Для примера, в случае  $C_3/C_2 = 5$  потенциал электрода 2 понизился бы на 41.2 кВ до -12.6 кВ (Рисунок 2.5, кривая 2).

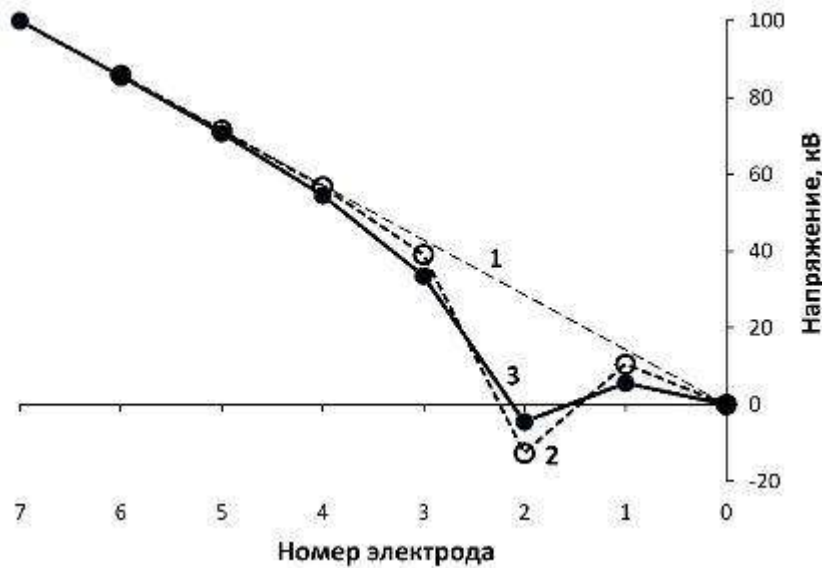


Рисунок 2.5 – Распределение напряжения по электродам разрядника до подачи пускового импульса (кривая 1) и после прихода пускового импульса при  $C_3/C_2=5$  (кривая 2) и  $C_3/C_2=2$  (кривая 3). Амплитуда пускового напряжения 80 кВ

Распределение напряжения по электродам разрядника при последовательном пробое межэлектродных промежутков после подачи пускового импульса напряжения амплитудой 80 кВ показано на рисунке 2.6. Пусковой импульс нарушает равномерное распределение напряжения вблизи электрода 2 (рисунок 2.6, момент времени  $t_1$ ). При этом разность потенциалов по разные стороны от электрода 2 неодинакова. Разность потенциалов на зазорах, прилегающих к пусковому электроду, с учетом разности потенциалов на зазорах от зарядного напряжения накопителя, есть

$$U_3 - U_2 = U_0/7 + (U_{trig,3} - U_{trig,2}) \approx U_0/7 - 0.293 \cdot U_{trig}, \quad (2.7)$$

$$U_2 - U_1 = U_0/7 + (U_{trig,2} - U_{trig,1}) \approx U_0/7 + 0.302 \cdot U_{trig}. \quad (2.8)$$

Большая разность потенциалов создается со стороны высоковольтного электрода разрядника в зазоре между электродами 2 и 3. Здесь разность потенциалов возрастает более чем в 2.5 раза с 14.3 кВ до 38 кВ, что приводит к пробое зазора. После пробоя зазора пусковое напряжение оказывается приложенным к электроду 3 (рисунок 2.6, момент времени  $t_2$ ), происходит пробой зазора между электродами 3 и 4 и т.д. Последовательно пробиваются зазоры разрядника в сторону высоковольтного электрода 7. После того как часть разрядника между электродами 2 и 7 пробилась, напряжение емкостного накопителя  $U_0$  оказывается приложенным к зазорам между электродами 0-1 и 1-2 (рисунок 2.6, момент времени  $t_6$ ). Их пробой может происходить при разности

потенциалов более чем в 4 раза выше начальной. После пробоя последних зазоров в нагрузке начинает протекать ток разряда емкостного накопителя энергии.

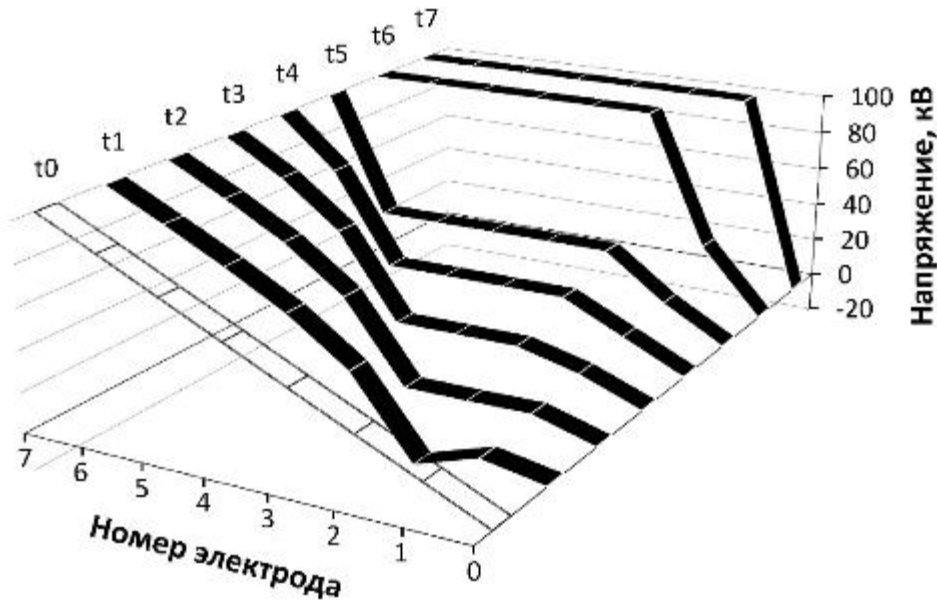


Рисунок 2.6 – Распределение напряжения по электродам разрядника при последовательном пробое межэлектродных промежутков.  $t_0$  и  $t_1$  – моменты времени до и после подачи пускового импульса на электрод 2;  $t_2$ – $t_7$  – моменты времени после пробоя зазоров 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7 и 1-2, соответственно. Амплитуда импульса пускового напряжения 80 кВ

Время задержки между приходом пускового импульса напряжения и запуском разрядника, стабильность запуска разрядника, число параллельно зажигаемых искровых каналов во многом определяются параметрами пускового импульса. Очевидно, что чем выше амплитуда и скорость нарастания импульса пускового напряжения, тем лучше. Однако при этом растут требования к изоляции и усложняется техническая реализация пусковой системы, особенно для многосекционных установок. Поэтому целесообразна экспериментальная оптимизация условий запуска разрядника.

### 2.3 Схема исследования параметров разрядника

Схема исследования параметров разрядника приведена на рисунке 2.7 [120]. Емкостной накопитель энергии  $C$  заряжается от высоковольтного зарядного источника (1) напряжением положительной полярности. Запуск разрядника осуществляется от генератора пусковых высоковольтных импульсов (2) отрицательной полярности. После запуска разрядника емкостной накопитель разряжается на резистивную нагрузку  $R_{load}$ .



Система регистрации включает в себя резистивный делитель  $R_1$ - $R_2$  пускового напряжения  $U_{trig}(t)$ , резистивный делитель  $R_3$ - $R_4$  напряжения на нагрузке  $U_{load}(t)$  и резистивный шунт  $R_5$  для измерения тока разряда  $I_{load}(t)$ . Также используется оптическая система диагностики на основе фотодиодов (3) для регистрации искровых каналов в зазорах разрядника. Система состоит из шести коллиматоров с протяженным отверстием, свет из которых по оптоволокну подается на фотодиоды со схемой предварительного усиления HFBR-25X6Z (Avago Technologies). Шесть сигналов  $U_1$ – $U_6$  с каждого из фотодиодов после усиления регистрируются цифровыми осциллографами Tektronix TDS 3054B с полосой 500 МГц. Временное разрешение фотодиодов и схемы усиления составляет единицы наносекунд.

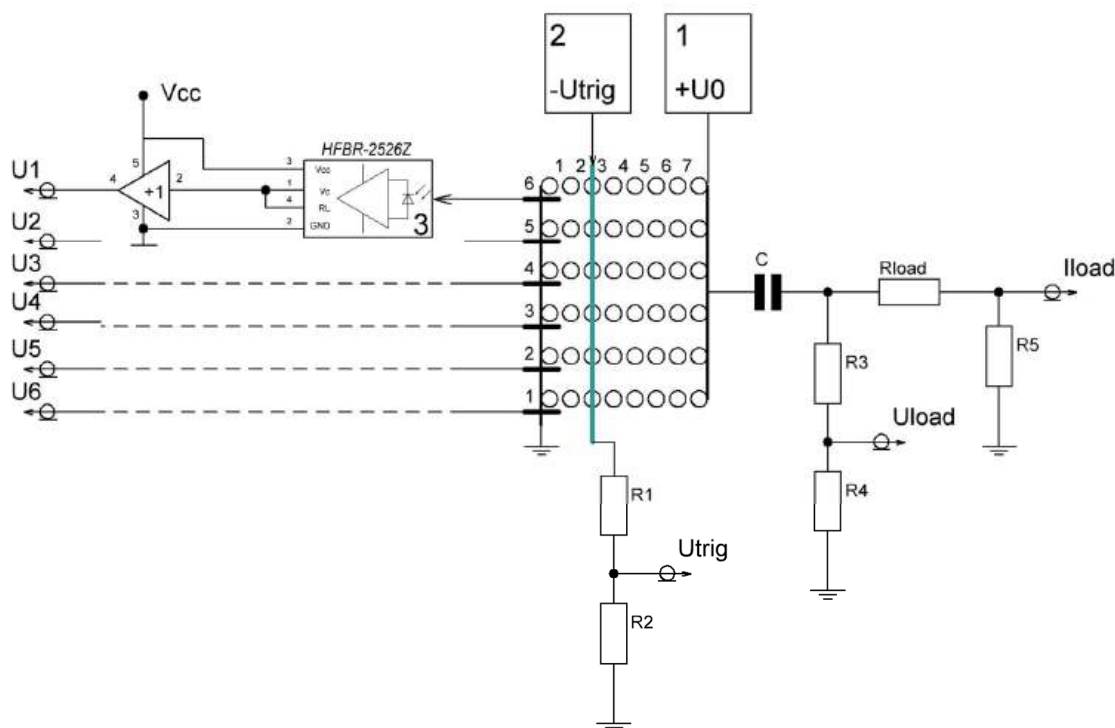


Рисунок 2.7 – Схема исследования разрядника: 1– высоковольтный зарядный источник, 2– генератор запускающих импульсов, 3– фотодиод со схемой предварительного усиления

В исследованиях варьировались зарядное напряжение и скорость нарастания пускового импульса. Набиралась статистика времени запаздывания  $t_d$  между приходом пускового импульса напряжения и пробоем всех зазоров разрядника. Время запаздывания  $t_d$  определялось как время между уровнями 10 % от амплитудного значения пускового импульса напряжения и напряжения на нагрузке. Статистическое время запаздывания характеризуется средним временем запаздывания  $\langle t_d \rangle$  в серии

импульсов и среднеквадратичным отклонением  $\sigma$  (джиттер разрядника). Джиттер является одной из основных характеристик разрядника, так как может приводить к затягиванию фронта и искажению формы импульса [97, 103, 104], уменьшению выходного напряжения и мощности генераторов, снижению эффективности вывода энергии в нагрузку [42, 99]. Допустимый джиттер разрядников в ЛТД генераторах с фронтом импульса  $\sim 100$  нс составляет порядка 1 нс.

Набиралась статистика числа зажигаемых искровых каналов в разряднике. Для этого шесть коллиматоров размещались в ряд в одной из семи позиций, соответствующей одному из зазоров разрядника. Расположение коллиматоров в разряднике показано на рисунках 2.8 и 2.9. Размеры и расположение коллиматоров настроены так, чтобы исключить попадание света с соседних каналов, т.е. через коллиматор проходит свет только из канала, над которым он размещен.

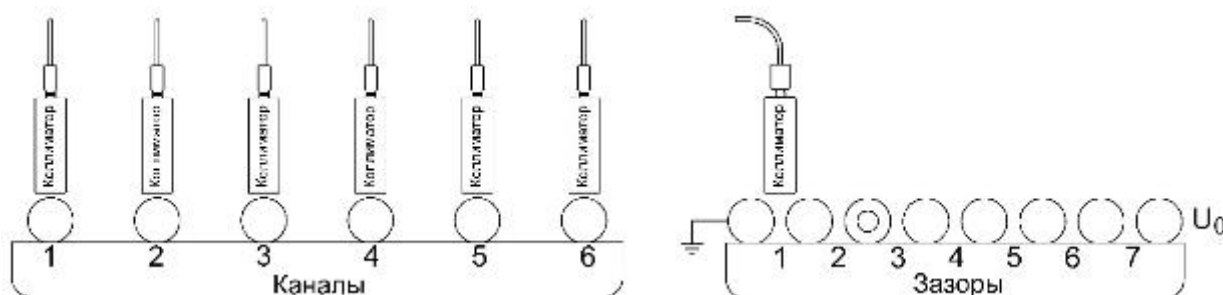


Рисунок 2.8 – Вид с торца и вид сбоку разрядника и положение коллиматоров

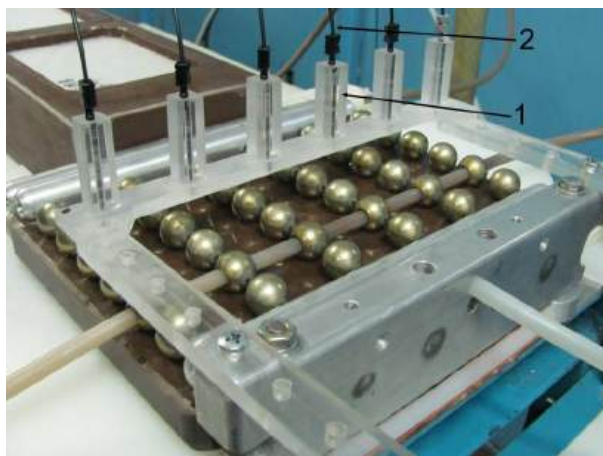


Рисунок 2.9 – Фотография оптической системы регистрации искровых каналов в зазорах разрядника: 1– коллиматор с протяженным отверстием, 2– оптоволокну

Порядок сбора статистики числа зажигаемых каналов был следующим. Линейка из шести коллиматоров размещалась над зазором 1 (как показано на рисунке 2.8).

Выполнялась серия из  $N_0=50$  последовательных импульсов и определялось, сколько каналов и какие именно зажигались в зазоре 1 в каждом из импульсов. Рассчитывалась вероятность зажигания каждого из шести каналов в зазоре 1:  $\left(\frac{N}{N_0}\right) \times 100\%$ , где  $N$  – число случаев зажигания канала в серии из  $N_0$  последовательных импульсов. В расчете учитывались только случаи зажигания канала в течение фронта импульса тока разряда. Затем линейка из шести коллиматоров перемещалась в зазор 2. Выполнялась серия из  $N_0=50$  последовательных импульсов, определялось, сколько и какие каналы зажигались в зазоре 2, рассчитывалась вероятность зажигания каждого из шести каналов в зазоре 2. Затем линейка из шести коллиматоров перемещалась в зазор 3 и т.д. Таким образом линейка коллиматоров располагалась в семи позициях, в каждой из которых выполнялась серия из 50 импульсов. Суммарная серия для определения вероятности зажигания каждого из шести каналов в каждом из семи зазоров в фиксированных условиях составляла 350 импульсов.

Примеры регистрируемых сигналов при зарядном напряжении емкостного накопителя энергии  $U_0=100$  кВ даны на рисунках 2.10 и 2.11.

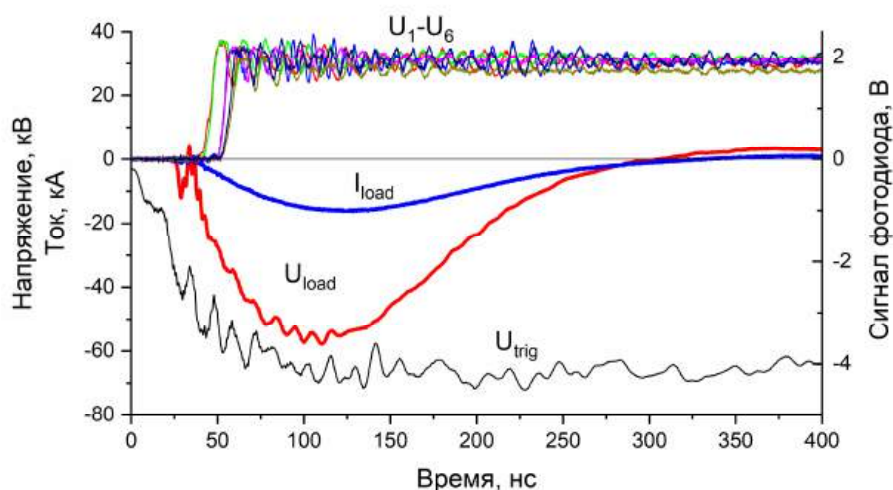


Рисунок 2.10 – Осциллограммы импульса пускового напряжения  $U_{trig}$ , напряжения на нагрузке  $U_{load}$ , тока разряда  $I_{load}$  и сигналов с шести фотодиодов  $U_1-U_6$ , регистрирующих свет из искровых зазоров одного ряда, для случая зажигания всех шести каналов разряда

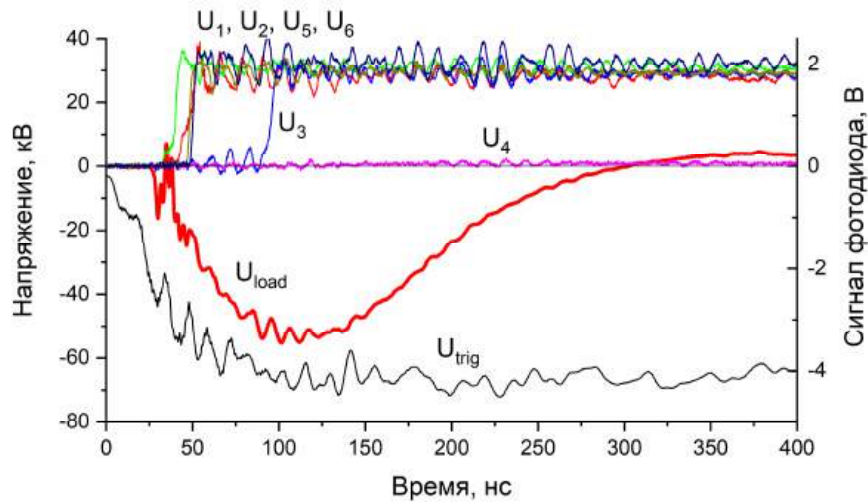


Рисунок 2.11 – Осциллограммы импульса пускового напряжения  $U_{trig}$ , напряжения на нагрузке  $U_{load}$ , тока разряда  $I_{load}$  и сигналов с шести фотодиодов  $U_1-U_6$ , регистрирующих свет из искровых зазоров одного ряда для случая, когда канал 3 зажегся с задержкой 50 нс, а канал 4 не зажегся вообще

После прихода пускового импульса напряжения  $U_{trig}$  с некоторым запаздыванием по времени последовательно пробиваются все зазоры разрядника, начинает протекать ток разряда  $I_{load}$ , на нагрузке генерируется импульс напряжения  $U_{load}$ . В первом примере зажигаются все шесть каналов с абсолютным разбросом 10 нс. Во втором примере зажигаются пять из шести каналов, причем третий канал зажигается с задержкой 50 нс относительно остальных каналов.

#### 2.4 Стабильность срабатывания разрядника (джиттер разрядника)

Данные по джиттеру разрядника получены для трех импульсов пускового напряжения со средней скоростью нарастания 0.1, 0.7 и 3 кВ/нс, амплитудой около 40, 80 и 100 кВ, соответственно (рисунок 2.12).

Экспериментальные данные по времени запаздывания и джиттеру разрядника в зависимости от скорости нарастания импульса пускового напряжения и напряжения на разряднике приведены на рисунках 2.13–2.15. Данные по статистическому времени запаздывания обобщены в таблицах 2.1–2.3. Время задержки срабатывания разрядника  $t_d$  и джиттер разрядника  $\sigma$  снижаются с увеличением скорости нарастания импульса пускового напряжения и начального напряжения на разряднике.

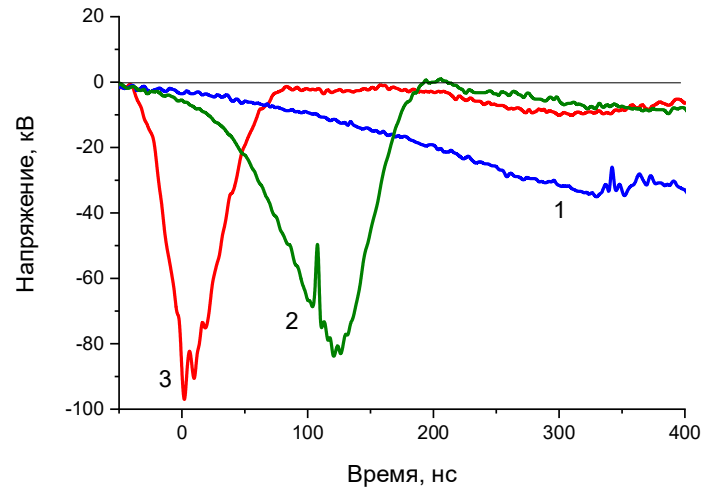


Рисунок 2.12 – Импульсы пускового напряжения со средней скоростью нарастания 0.1 кВ/нс (кривая 1), 0.7 кВ/нс (кривая 2) и 3 кВ/нс (кривая 3)

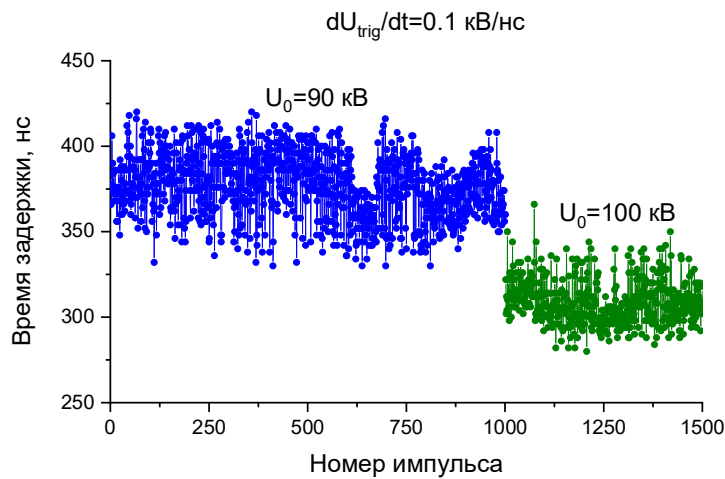


Рисунок 2.13 – Время задержки срабатывания разрядника при скорости нарастания пускового импульса 0.1 кВ/нс и зарядном напряжении емкостного накопителя энергии 90–100 кВ

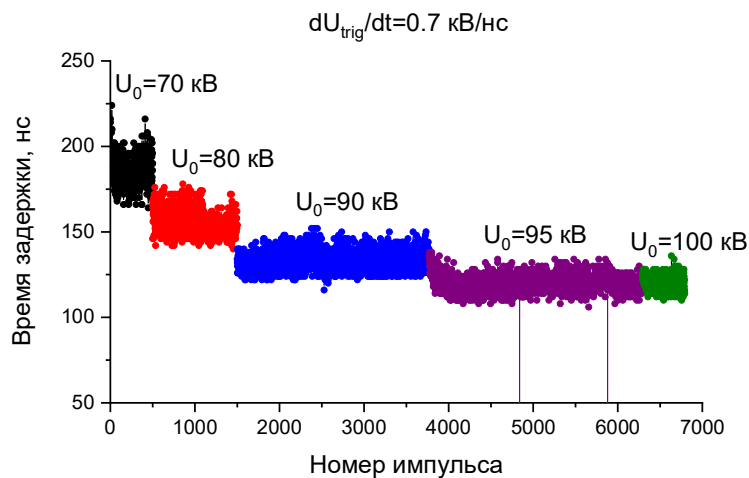


Рисунок 2.14 – Время задержки срабатывания разрядника при скорости нарастания пускового импульса 0.7 кВ/нс и зарядном напряжении емкостного накопителя энергии 70–100 кВ

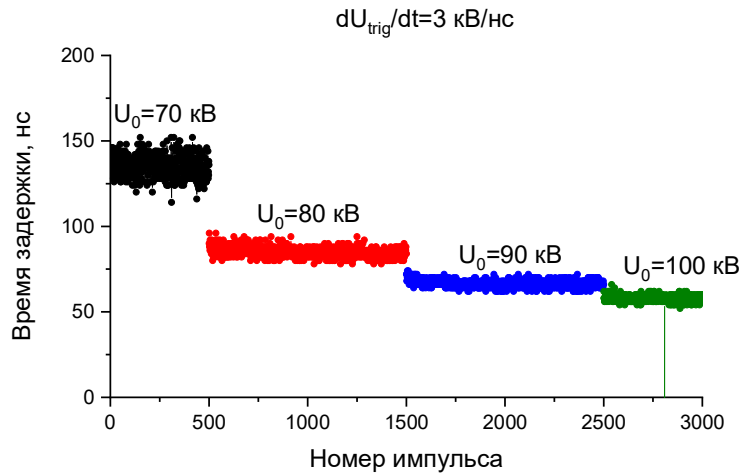


Рисунок 2.15 – Время задержки срабатывания разрядника при скорости нарастания пускового импульса 3 кВ/нс и зарядном напряжении емкостного накопителя энергии 70–100 кВ

Таблица 2.1 – Среднее значение задержки срабатывания  $\langle t_d \rangle$  и джиттер разрядника  $\sigma$  при скорости нарастания пускового импульса напряжения 0.1 кВ/нс

Зарядное напряжение, кВ	Задержка срабатывания	
	Среднее значение, $\langle t_d \rangle$ , нс	Среднеквадратичное отклонение, $\sigma$ , нс
90	377	19
100	309	13

Таблица 2.2 – Среднее значение задержки срабатывания  $\langle t_d \rangle$  и джиттер разрядника  $\sigma$  при скорости нарастания пускового импульса напряжения 0.7 кВ/нс

Зарядное напряжение, кВ	Задержка срабатывания	
	Среднее значение, $\langle t_d \rangle$ , нс	Среднеквадратичное отклонение, $\sigma$ , нс
70	186	9
80	157	7
90	133	6
95	120	5
100	118	4

Таблица 2.3 – Среднее значение задержки срабатывания  $\langle t_d \rangle$  и джиттер разрядника  $\sigma$  при скорости нарастания пускового импульса напряжения 3 кВ/нс

Зарядное напряжение, кВ	Задержка срабатывания	
	Среднее значение, $\langle t_d \rangle$ , нс	Среднеквадратичное отклонение, $\sigma$ , нс
70	135	6
80	85	3
90	66	2
100	58	2

При использовании импульса пускового напряжения с низкой скоростью нарастания  $\sim 0.1$  кВ/нс и амплитудой  $\approx 40$  кВ устойчивый запуск реализуется только при напряжении на разряднике  $\geq 90$  кВ. Джиттер разрядника  $\sigma$  превышает 10 нс.

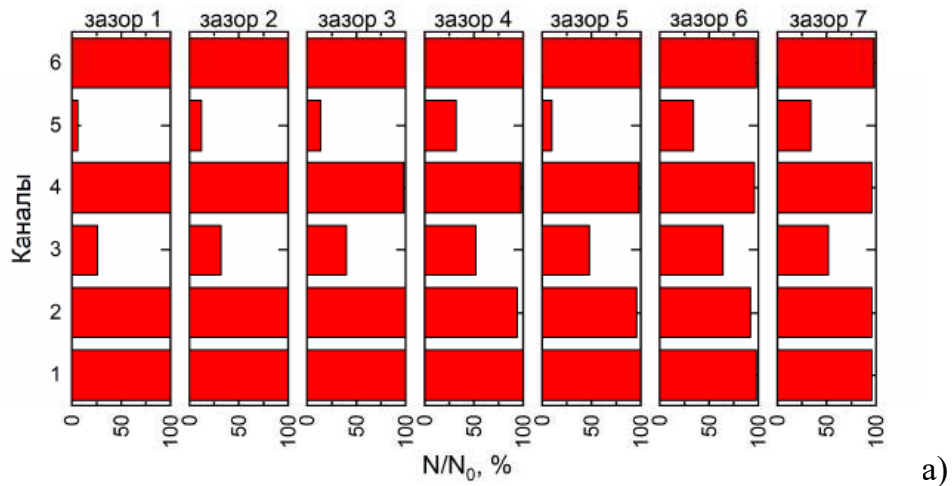
При использовании импульса пускового напряжения со скоростью нарастания  $\approx 0.7$  кВ/нс случаи несрабатывания разрядника возможны при напряжении на разряднике ниже 60 кВ. Устойчивый запуск разрядника реализуется при напряжении  $\geq 70$  кВ. Джиттер разрядника  $\sigma$  составляет менее 10 нс. Таким образом, рабочий диапазон напряжения разрядника для данного пускового импульса 70 – 100 кВ.

Наносекундную точность включения разрядника способен обеспечить импульс пускового напряжения со скоростью нарастания  $\approx 3$  кВ/нс. Так, при начальном напряжении на разряднике 90 – 100 кВ джиттер разрядника составляет около 2 нс.

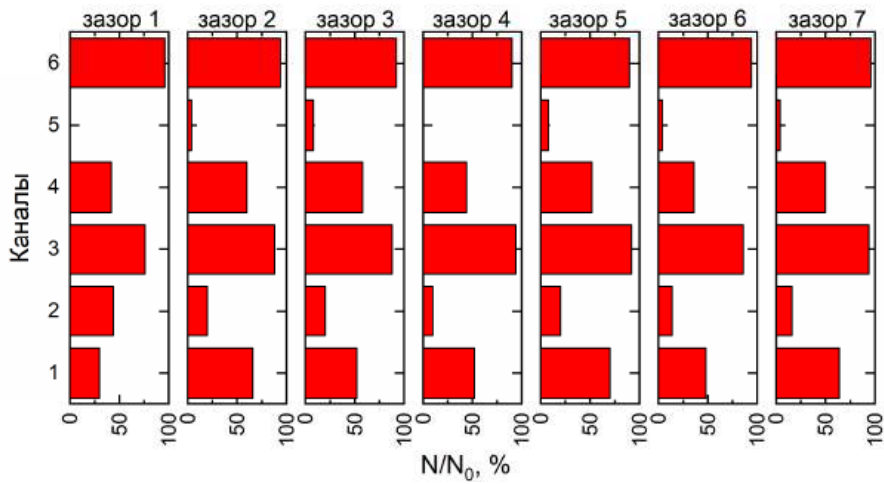
## 2.5 Число каналов в разряднике

### 2.5.1 Вероятность зажигания параллельных каналов в разряднике [120]

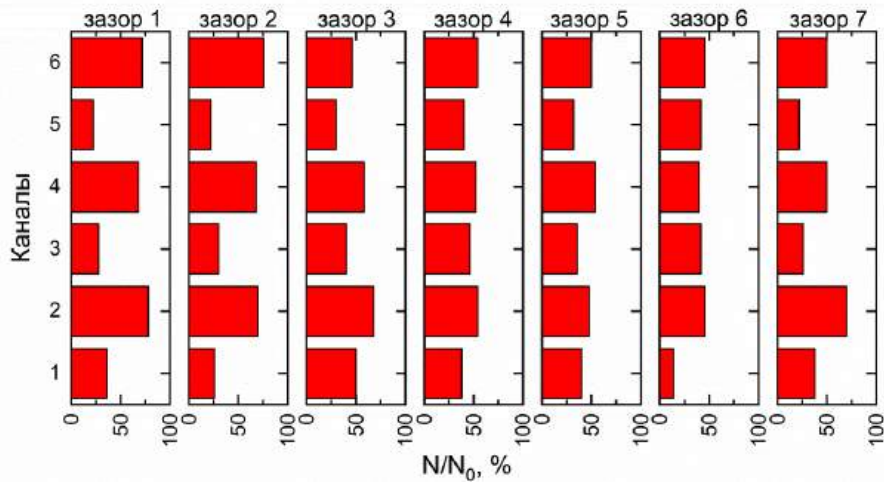
Была определена вероятность зажигания параллельных искровых каналов в разряднике в зависимости от начального напряжения на разряднике и скорости нарастания пускового импульса напряжения. На рисунке 2.16 приведены данные по вероятности зажигания каналов в каждом из семи зазоров первого варианта разрядника для трех импульсов пускового напряжения с разной скоростью нарастания. Данные показывают, что число каналов во всех зазорах одинаково и определяется числом каналов, инициируемых пусковым импульсом в зазоре 3. При скорости нарастания пускового импульса 0.8 кВ/нс и зарядном напряжении 100 кВ во всех зазорах разрядника зажигается по 4 параллельных канала с вероятностью не ниже 85 %. С уменьшением скорости нарастания пускового напряжения число параллельно зажигаемых каналов падает. Так, при трехкратном снижении скорости нарастания пускового импульса вероятность одновременного зажигания четырех параллельных каналов в зазорах не превышает 32 %. С уменьшением начального напряжения на разряднике вероятность одновременного зажигания параллельных каналов также ожидаемо снижается (рисунок 2.17).



а)



б)



в)

Рисунок 2.16 – Вероятности зажигания искровых каналов в зазорах разрядника с резистивной развязкой между каналами проводящей резиной при зарядном напряжении 100 кВ и средней скорости нарастания импульса пускового напряжения 0.8 кВ/нс (а), 0.25 кВ/нс (б) и 0.1 кВ/нс (в)



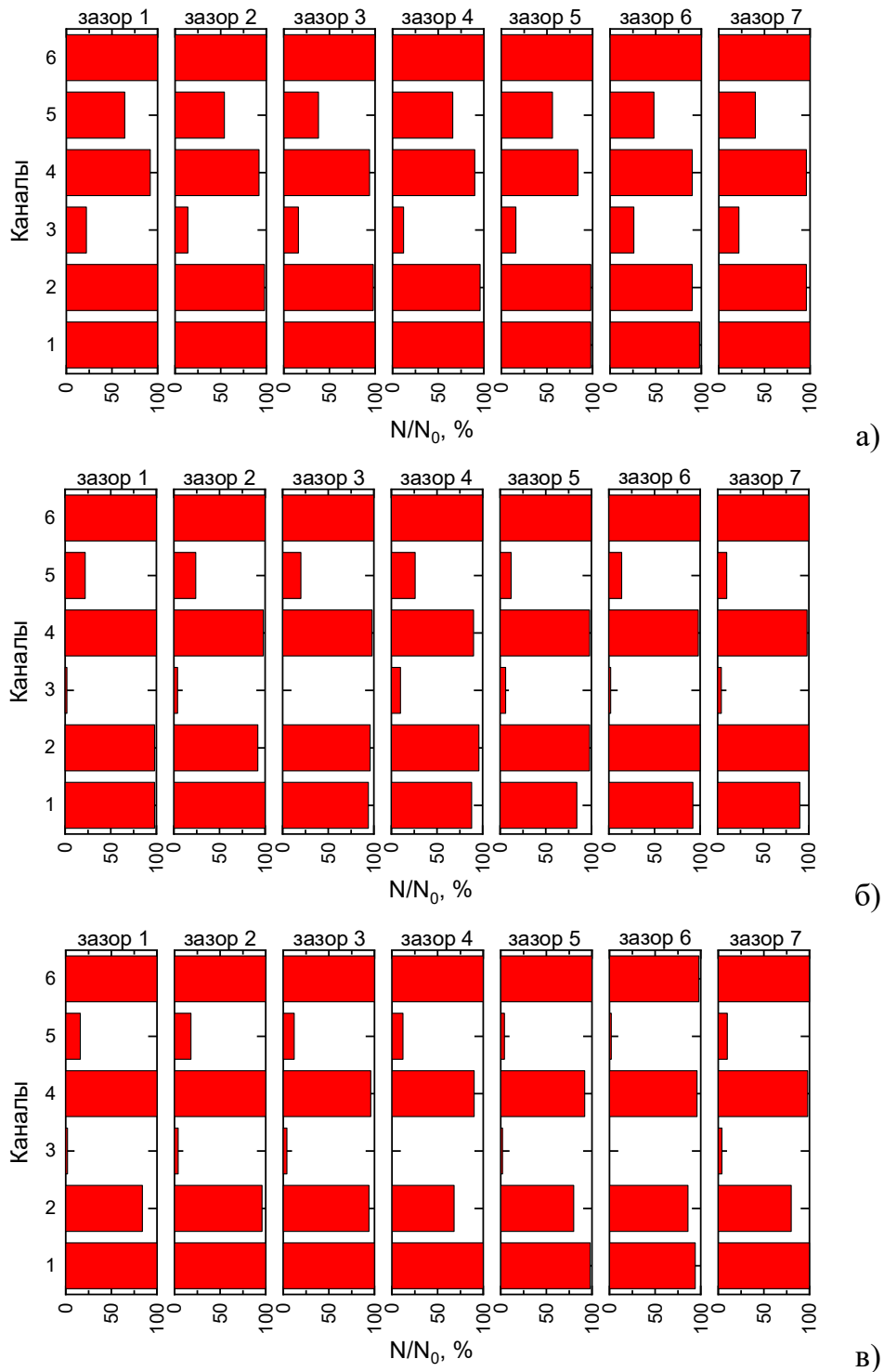


Рисунок 2.17 – Вероятности зажигания искровых каналов в зазорах разрядника с резистивной развязкой между каналами проводящей резиной при средней скорости нарастания импульса пускового напряжения 0.8 кВ/нс и зарядном напряжении 90 кВ (а), 80 кВ (б) и 70 кВ (в)

Результаты показывают, что даже при скорости нарастания пускового импульса порядка 1 кВ/нс в разряднике устойчиво зажигаются четыре из возможных шести каналов. Ситуация улучшается при переходе ко второму варианту разрядника, где резистивная развязка между каналами заменена на индуктивную с помощью соленоидов

из нержавеющей стали (рисунок 2.18). В этом случае даже при скорости нарастания пускового импульса 0.4 кВ/нс и начальном напряжении на разряднике 80–90 кВ во всех зазорах разрядника зажигаются все шесть параллельных каналов с вероятностью не ниже 80 %.

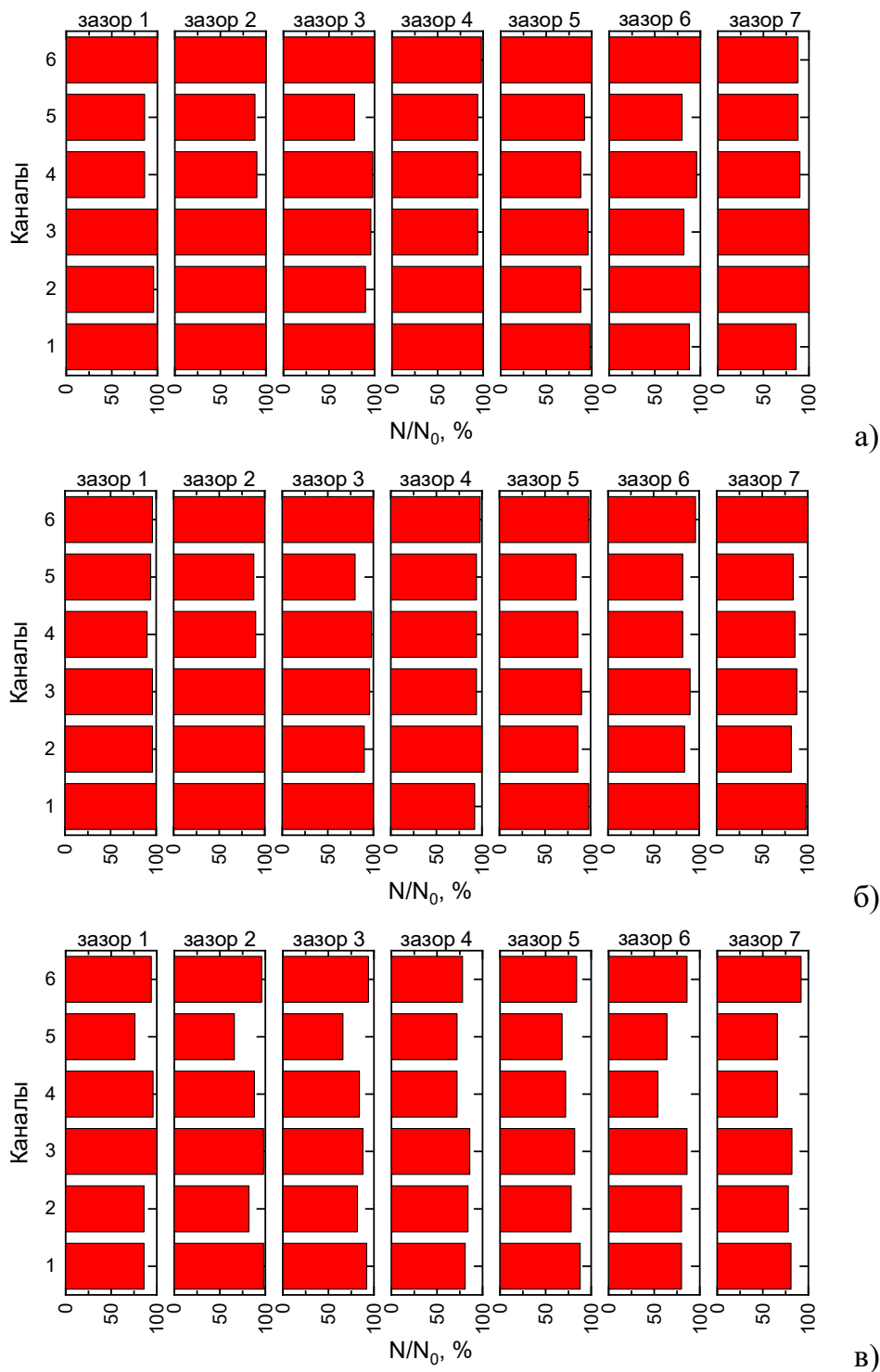


Рисунок 2.18 – Вероятности зажигания искровых каналов в зазорах разрядника с индуктивной развязкой между каналами соленоидов из нержавеющей стали при средней скорости нарастания импульса пускового напряжения 0.4 кВ/нс и зарядном напряжении 90 кВ (а), 80 кВ (б) и 70 кВ (в)

### 2.5.2 Влияние электрической развязки между каналами [121]

Распределение напряжения по зазорам разрядника на рисунке 2.6 показывает, что по мере пробоя зазоров возможное перенапряжение на непробитых зазорах растет. В случае отсутствия электрической развязки между каналами одного зазора перераспределение тока между зазорами соседних каналов не затруднено и допустима ситуация, когда ток в зазорах одного канала разный. Тогда можно надеяться на рост числа параллельных искровых каналов по мере удаления от пускового зазора в направлении емкостного накопителя энергии и в двух зазорах со стороны заземленного электрода. С целью проверки данного предположения был изготовлен модифицированный вариант разрядника без электрической развязки между каналами. Для электрического соединения шаровых электродов одного ряда использовались стержни диаметром 6 мм из нержавеющей стали. В этом случае  $R_2=0$  на схеме рисунка 2.3, а. Система запуска разрядника осталась прежней.

Вероятности зажигания каналов в разряднике без электрической развязки между каналами приведены на рисунке 2.19. Экспериментальные данные подтверждают рост числа каналов в перенапряженных зазорах. В третьем зазоре, который пробивается первым, практически всегда зажигается только один канал. По мере пробоя последующих зазоров число параллельных каналов растет, что обусловлено как ростом перенапряжения, так и интенсивной подсветкой из пробитых зазоров. Наибольшее число параллельных каналов получается в зазорах, пробивающихся последними: ближний к емкостному накопителю зазор (зазор 7) и два зазора со стороны заземленного электрода (зазоры 1 и 2). С уменьшением скорости нарастания пускового напряжения число параллельно зажигаемых каналов снижается. Тем не менее, даже при скорости нарастания 0.1 кВ/нс в зазорах 1 и 2 с вероятностью более 75 % зажигается пять каналов, а в зазоре 7 зажигается четыре канала.

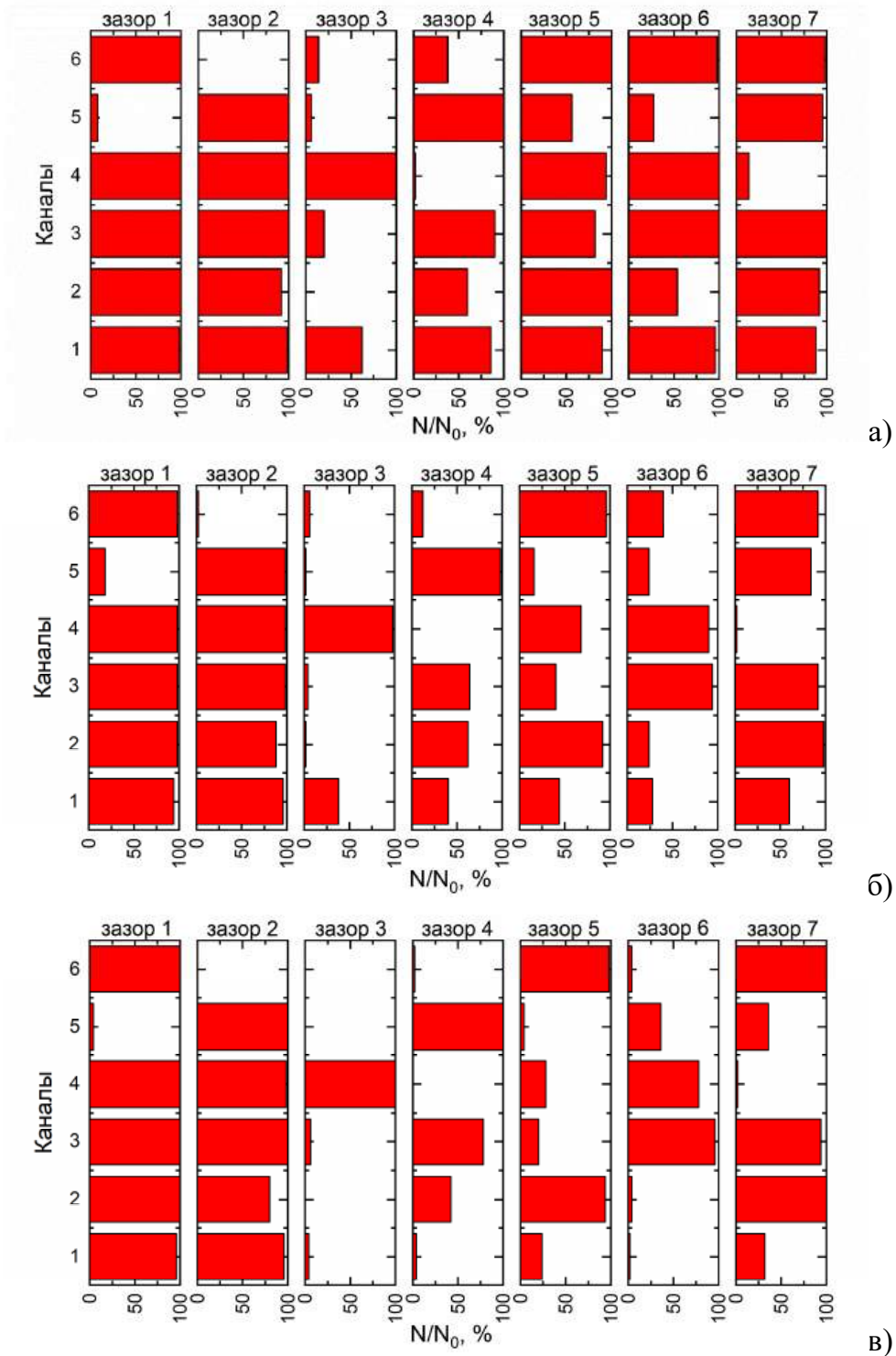


Рисунок 2.19 – Вероятности зажигания искровых каналов в зазорах разрядника без электрической развязки между каналами. Зарядное напряжение 100 кВ. Скорость нарастания импульса пускового напряжения 0.8 кВ/нс (а), 0.25 кВ/нс (б) и 0.1 кВ/нс (в)

## 2.6 Ресурс разрядника

Данные по ресурсу разрядника получены при проведении ресурсных испытаний секции ЛТД ступени (подраздел 3.4), когда разрядник не обслуживался в течение серии

из  $\sim 10^5$  включений. В испытаниях амплитуда тока через разрядник составляла  $\approx 50$  кА, переносимый заряд за импульс – около 14 мКл. За всю серию уменьшение диаметра электродов разрядника из-за уноса материала и, соответственно, увеличение межэлектродного зазора составило  $\approx 0.2$  мм. По мере наработки увеличилось время задержки запуска разрядника относительно пускового импульса на 50 нс, но разрядник сохранил свою работоспособность с джиттером на уровне  $\approx 5$  нс.

## 2.7 Выводы

Создан управляемый многозазорный многоканальный газовый разрядник планарной геометрии, работающий в сухом воздухе атмосферного давления при напряжении 100 кВ. При использовании импульса пускового напряжения со средней скоростью нарастания около 1 кВ/нс устойчивый запуск разрядника с джиттером менее 10 нс реализуется при начальном напряжении от 70 кВ и выше без каких-либо изменений межэлектродных промежутков или давления газа. Таким образом рабочий диапазон напряжения разрядника для такого пускового импульса составляет 70–100 кВ. При скорости нарастания пускового импульса напряжения около 3 кВ/нс и напряжении на разряднике 80–100 кВ реализуется наносекундная точность включения разрядника с джиттером менее 3 нс.

Число зажигаемых каналов и их распределение по зазорам разрядника зависит от наличия электрической развязки между каналами. При наличии электрической развязки между каналами, число каналов во всех зазорах одинаково и определяется числом каналов, инициируемых пусковым импульсом в пусковом зазоре. Достигнуто параллельное зажигание шести искровых каналов в разряднике с вероятностью не ниже 80 % при скорости нарастания пускового импульса не менее 0.4 кВ/нс и начальном напряжении на разряднике от 80 кВ и выше. В случае отсутствия электрической развязки между каналами в зазоре, который пробивается первым, практически всегда зажигается только один канал. По мере пробоя последующих зазоров число параллельных каналов растет. Наибольшее число параллельных каналов реализуется в зазорах, пробивающихся последними. В этих зазорах зажигается 4–5 каналов с

вероятностью более 75 % даже при малой скорости нарастания пускового импульса напряжения (около 0.1 кВ/нс).

При амплитуде тока через разрядник около 50 кА и переносимом за импульс заряде около 14 мКл разрядник сохраняет свою работоспособность с наносекундой точностью включения в течение серии из  $10^5$  импульсов без какого-либо обслуживания.

### 3 Секции ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления и зарядным напряжением до 100 кВ

#### 3.1 Конденсаторы секций

##### 3.1.1 Выбор конденсаторов секций

Основными критериями выбора конденсаторов секции являются их емкость, индуктивность, зарядное напряжение и габаритные размеры. Эти параметры определяют возможность получения выходного импульса заданной длительности и мощности, а также дают представление о размерах емкостного накопителя энергии, которые должны быть минимально возможными.

Параметры ряда серийно выпускаемых импульсных конденсаторов, имеющих наиболее высокие удельные характеристики, приведены в таблице 3.1 [122–127]. Большинство отобранных для сравнения конденсаторов имеют уровень рабочего напряжения около 100 кВ, емкость порядка 10–100 нФ и индуктивность менее 100 нГн. В таблице используются следующие обозначения:  $U_0$  – максимальное зарядное напряжение;  $C$ ,  $L$  – емкость и индуктивность конденсатора;  $I$  – предельный ток;  $W_0$  – максимальная запасаемая энергия;  $w_v$  и  $p_v$  – удельные энергия и мощность, пересчитанные на единицу объема конденсатора  $V$ . Удельная мощность

$$p_v = \frac{0.3U_0^2}{V\sqrt{L/C}} \quad (3.1)$$

рассчитывалась из условия разряда конденсатора на нагрузку  $R = \sqrt{L/C}$ . В действительности мощность разряда конденсатора существенно (в несколько раз) ниже значения, соответствующего (3.1), поскольку определяется не только собственной индуктивностью конденсатора, но и индуктивностью коммутатора, индуктивностью токоведущих шин и нагрузки, а также сопротивлением коммутатора. Однако на этапе сравнительного анализа конденсаторов учитывалась только их собственная индуктивность.

Удельные энергия и мощность позволяют сравнить конденсаторы по временным характеристикам, например, по времени нарастания импульса до максимума на нагрузке

$$R = \sqrt{L/C}:$$

$$t_1 \approx 1.2\sqrt{LC} \approx 0.7 \frac{w_v}{p_v} \quad (3.2)$$

или по времени, за которое в нагрузку выводится 97 % запасенной энергии:

$$t_2 \approx 3\sqrt{LC} \approx 1.8 \frac{w_v}{p_v}. \quad (3.3)$$

Таблица 3.1 – Характеристики промышленно выпускаемых импульсных конденсаторов

Тип конденсатора	$U_0$ , кВ	$C$ , нФ	$L$ , нГн	$I$ , кА	Размеры, см	Ресурс, имп.	$W_0$ , Дж	$w_v$ , Дж/см <sup>3</sup>	$p_v$ , МВт/см <sup>3</sup>	$t_1$ , нс	$t_2$ , нс
ОАО «КВАР» (Россия, г. Серпухов) [122]											
ИЭП-100-0.05 УХЛ4	100	50	100	5	16×16×30	–	250	0.03	0.28	82	211
ИМН-100-0.1 УХЛ4	100	100	140	50	45.5×15×32.6	–	500	0.02	0.11	138	355
ИЭП-200-0.1	200	100	200	50	45.5×15×32.6	–	2000	0.09	0.38	165	424
ЗАО «Русская технологическая группа 2» (Россия, г. Москва) [123]											
КПИ-200-0.04	200	40	80	–	45×16×32.6	3·10 <sup>7</sup>	800	0.03	0.36	66	170
КПИ-200-0.06	200	60	80	–	45×16×32.6	3·10 <sup>7</sup>	1200	0.05	0.44	81	208
КПИМ1-100-0.13	100	130	12	–	16×16×36	1·10 <sup>7</sup>	650	0.07	1.07	46	118
ЗАО «Элкод» (Россия, г. Санкт-Петербург) [124]											
К75-48М	25	100	20	50	∅7.5×15.6	1.2·10 <sup>5</sup>	31	0.04	0.61	52	133
К75-74	40	100	85*	10**	∅10×27	(5000 ч.)	80	0.04	0.24	111	277
К75-74	40	22	85*	10**	∅4.8×27	(5000 ч.)	17.6	0.04	0.50	52	130
General Atomics (США) [125]											
35436	100	8	32*	25	5.8×15×14.6	1·10 <sup>5</sup>	40	0.03	1.18	19	48
35426	100	40	34*	25	5.8×15×19.7	5·10 <sup>4</sup>	200	0.12	1.90	44	110
35479	100	80	–	25	5.8×15×24.1	4·10 <sup>4</sup>	400	0.19	–	–	–
NWL (США) [126]											
	80	40	45	60	7.1×15×21.9	2.5·10 <sup>3</sup>	128	0.05	0.78	51	127
	85	40	45	40	7.1×15×24.1	5·10 <sup>4</sup>	144	0.06	0.80	51	127
Pluspark (Китай) [127]											
PDE	100	80	–	–	15.4×15.4×24.5	–	400	0.07	–	–	–
PDE	100	40	69*	25	6.9×15.2×19.2	1·10 <sup>4</sup>	200	0.10	1.13	63	158
Wuxishi Ximai Electric Appliance Co. (Китай)											
СВВ94	100	40	48*	25	6.9×15.2×19.2	1·10 <sup>4</sup>	200	0.10	1.36	53	131

\* Определено экспериментально, способ определения представлен в подразделе 3.1.2.

\*\* Рассчитано для апериодического режима разряда, в соответствии с рекомендацией производителя.



Согласно данным таблицы 3.1 лучшими характеристиками обладают конденсаторы американской фирмы General Atomics (GA) серии 35xxx, а также конденсаторы китайского производства СВВ94 (Wuxishi Ximai Electric Appliance) и PDE (Pluspark). На момент начала работы над диссертацией на рынке присутствовали только американские конденсаторы. Китайские конденсаторы, являющиеся копией конденсаторов фирмы General Atomics, появились на рынке позже. Американские конденсаторы серий GA35426 и GA35436, а затем и китайские конденсаторы серии СВВ94 были выбраны и использованы в секциях ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления и зарядным напряжением 100 кВ [115, 128]. Эти конденсаторы выполнены в пластиковом корпусе.

### 3.1.2 Индуктивность и сопротивление конденсаторов секций

Индуктивность конденсаторов зависит от формы и положения обратного токопровода. В спецификациях производителей указывается минимально возможное значение. Внутреннее сопротивление конденсаторов, как правило, не указывается.

Для экспериментального определения внутреннего сопротивления и индуктивности конденсаторов в условиях, приближенных к геометрии их размещения в ЛТД ступенях, использовалась схема, представленная на рисунке 3.1. Выводы конденсатора соединялись медной шиной шириной 170 мм по одной стороне, образуя короткозамкнутый контур. Расстояние от шины до корпуса конденсатора составляло 5 мм. Короткозамкнутый контур возбуждался от заряженного кабеля  $T$  с параметрами  $\rho=75$  Ом,  $\tau=89$  нс, генерирующего импульс напряжения с фронтом  $\sim 5$  нс и длительностью 178 нс. Измерялись напряжение  $U$  на выходе кабеля с помощью резистивного делителя напряжения и производная тока  $dI/dt$  переходного процесса в короткозамкнутом контуре конденсатора с помощью индуктивного датчика. Пример экспериментальных осциллограмм приведен на рисунке 3.2.

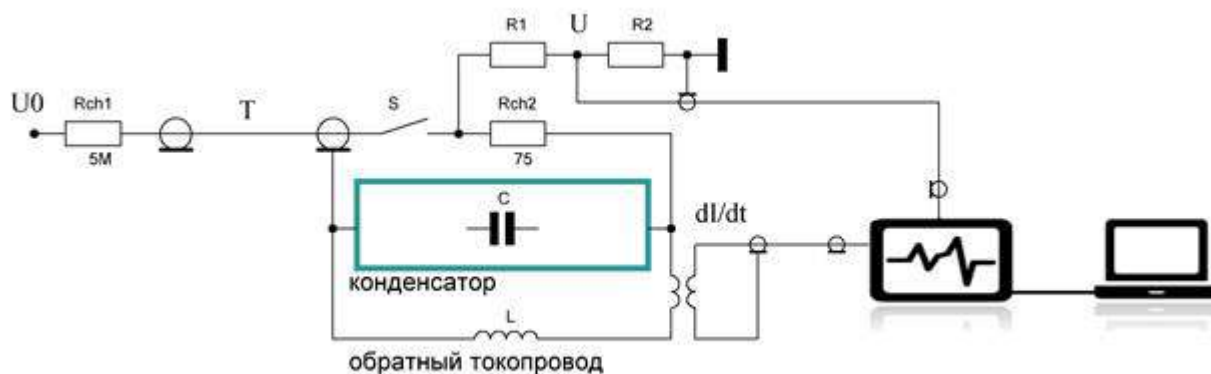


Рисунок 3.1 – Схема определения параметров конденсатора

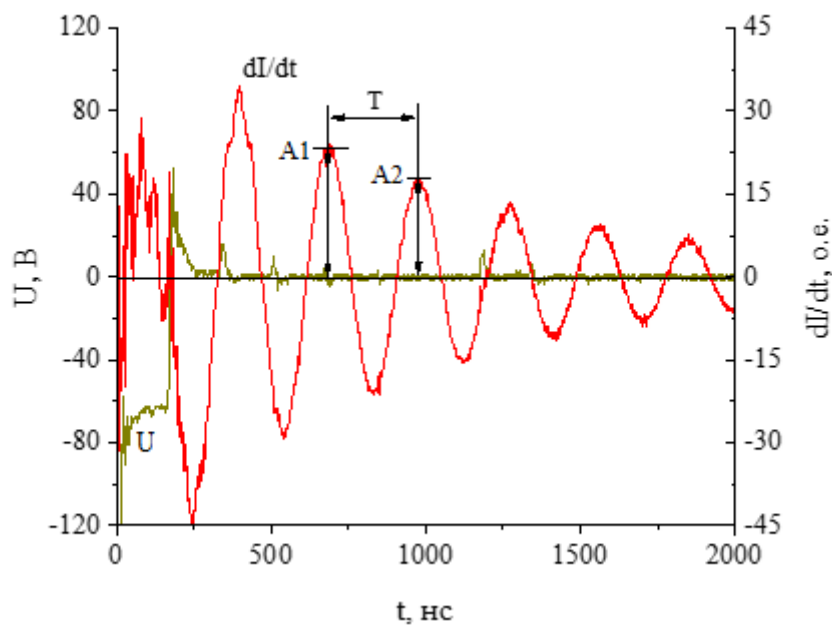


Рисунок 3.2 – Пример осциллограммы напряжения  $U$  на выходе кабеля и производной тока короткого замыкания  $dI/dt$  конденсатора СВВ94

Емкость конденсатора  $C$  определялась с помощью измерителя импеданса E7-23M. Индуктивность  $L$  и внутреннее сопротивление  $R$  конденсатора рассчитывались из осциллограммы производной тока разряда:

$$L = \frac{T^2}{C(4\pi^2 + \ln^2(\frac{A_1}{A_2}))}, \quad (3.4)$$

$$R = \frac{2L}{T} \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right), \quad (3.5)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – два максимума на осциллограмме, сдвинутые на период  $T$ .

Усредненные результаты измерений параметров конденсаторов серий СВВ94, GA35426 и GA35436 обобщены в таблице 3.2. Для конденсаторов емкостью 40 нФ временная постоянная  $(LC)^{1/2}$  в исследованной геометрии ошиновки составляет около 40 нс, а импеданс  $(L/C)^{1/2} \sim 1$  Ом. Для конденсатора емкостью 8 нФ временная постоянная  $(LC)^{1/2}$  более чем в 2 раза ниже и составляет около 16 нс, а импеданс  $(L/C)^{1/2}$  в 2 раза выше и составляет около 2 Ом.

Таблица 3.2 – Параметры конденсаторов (усредненное значение для трех экземпляров)

Тип конденсатора	C, нФ	T, нс	L, нГн	R, Ом	$(L/C)^{1/2}$ , Ом	$(L \cdot C)^{1/2}$ , нс
СВВ94	41.4	284	48	0.1	1.0	44
GA35426	39.4	229	34	0.1	0.9	37
GA35436	8.3	103	32	0.1	2.0	16

### 3.2 Конструкция секций

Конденсаторы GA и СВВ94 предназначены для использования в трансформаторном масле, и связано это с электрической прочностью внешней поверхности диэлектрического корпуса. Для усиления внешней изоляции была разработана технология размещения конденсаторов внутри жесткого корпуса из компаунда на основе эпоксидной смолы с наполнителем из кварцевой пыли и дибутилфталатом в качестве пластификатора. Такой корпус усиливает внешнюю изоляцию и делает возможным эксплуатацию конденсаторов в воздухе атмосферного давления при зарядном напряжении 100 кВ. Кроме того, внутри этого корпуса размещается разрядник и, таким образом, секция становится единым конструктивным элементом. Последнее существенно улучшает эксплуатационные качества секции, расширяя возможности по компоновки емкостных накопителей на основе таких секций.

#### 3.2.1 Секция с емкостным накопителем 160 нФ

Конструкция и фотография секции с емкостью накопителя 160 нФ и максимальным зарядным напряжением 100 кВ (далее «секция 160 нФ») приведены на рисунках 3.3 и 3.4. Емкостной накопитель секции состоит из четырех параллельно

включенных конденсаторов СВВ94, 40 нФ, 100 кВ. Конденсаторы (1) залиты в корпус (2), имеющий полость для размещения разрядника планарной геометрии (3), описанного в разделе 2. Выводы конденсаторов соединяются с одной стороны со сборным электродом разрядника, а с другой – со сборным электродом нагрузки.

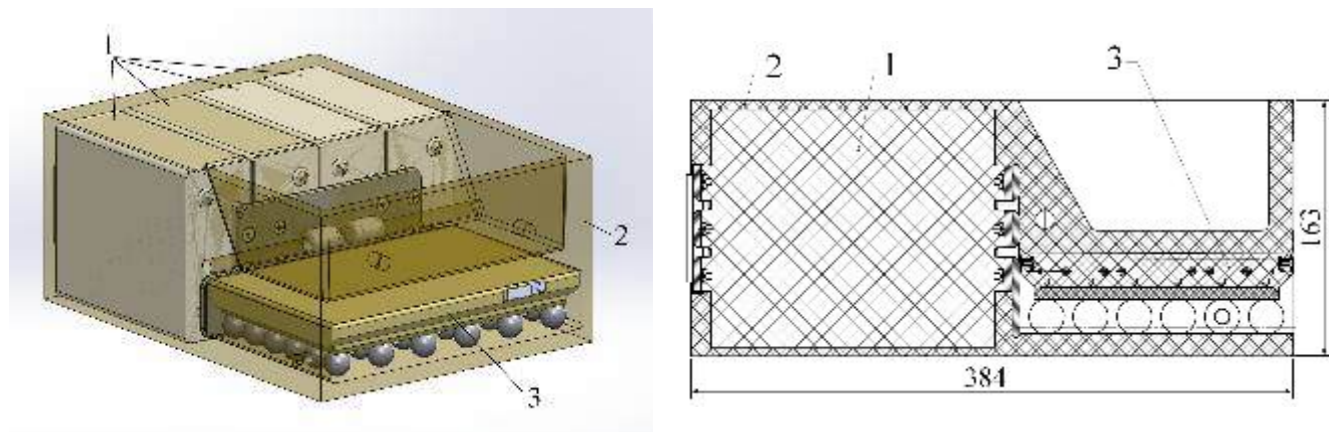


Рисунок 3.3 – Трехмерная модель и чертеж секции 160 нФ: 1– конденсаторы; 2– корпус секции; 3– разрядник



Рисунок 3.4 – Фотография секции 160 нФ с извлеченным разрядником

Габаритные размеры секции 160 нФ составляют 384 мм × 290 мм × 163 мм, вес секции с разрядником – 22,5 кг.

При максимальном зарядном напряжении 100 кВ в емкостном накопителе секции 160 нФ запасается энергия 800 Дж.

### 3.2.2 Секция с емкостным накопителем 80 нФ

Конструкция и фотография секции с емкостью накопителя 80 нФ и максимальным зарядным напряжением 100 кВ (далее «секция 80 нФ») приведены на рисунке 3.5.

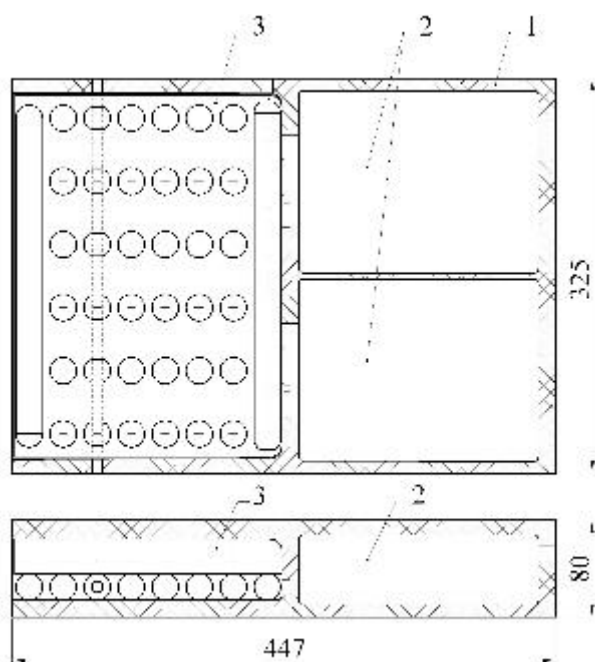


Рисунок 3.5 – Конструкция и фотография секции с емкостью накопителя 80 нФ: 1– корпус; 2– конденсаторы; 3– разрядник

Емкостной накопитель секции состоит из двух параллельно включенных конденсаторов GA35426, 40 нФ, 100 кВ. В общих чертах конструкция повторяет секцию 160 нФ. Основное отличие состоит в меньшем числе конденсаторов (два вместо четырех) и в их расположении внутри корпуса секции: конденсаторы лежат на широкой стороне, а не на узкой. Последнее обуславливает меньшую в 2 раза высоту секции: 80 мм вместо 163 мм. Габаритные размеры секции 80 нФ составляют 447 мм × 325 мм × 80 мм, вес секции с разрядником – около 17 кг.

При максимальном зарядном напряжении 100 кВ в емкостном накопителе секции 80 нФ запасается энергия 400 Дж.

### 3.2.3 Секция с емкостью накопителя 16 нФ

Конструкция секции с емкостью накопителя 16 нФ (далее «секция 16 нФ») аналогична секции 80 нФ. Вместо конденсаторов GA35426 в секции используются два конденсатора GA35436 емкостью 8 нФ и максимальным зарядным напряжением также 100 кВ. Длина секции составляет 402 мм вместо 447 мм из-за меньшей длины конденсаторов.

Габаритные размеры секции 16 нФ составляют 402 мм × 325 мм × 80 мм, вес секции с разрядником – около 16 кг.

При максимальном зарядном напряжении 100 кВ в емкостном накопителе секции 16 нФ запасается энергия 80 Дж.

### 3.3 Параметры секций

#### 3.3.1 Схема исследования параметров секций

Конструкция стенда для определения характеристик секций и его фотография со снятой верхней крышкой показаны на рисунке 3.6. Секция (1) устанавливается в корпусе (2) из металла, который служит обратным токопроводом и защитным экраном. Секция изолирована от нижней и верхней стенок корпуса (2) пластинами из оргстекла (3) толщиной 20 мм. Резисторы нагрузки (4) подключены между конденсаторами секции и корпусом (2). Зарядное напряжение подводится высоковольтным кабелем КВИ-120 через высоковольтный ввод (5). Импульс для запуска разрядника подается по кабелю РК-75 от генератора запускающих импульсов по пусковому проводнику разрядника (6), на конце которого размещается срезающий разрядник.

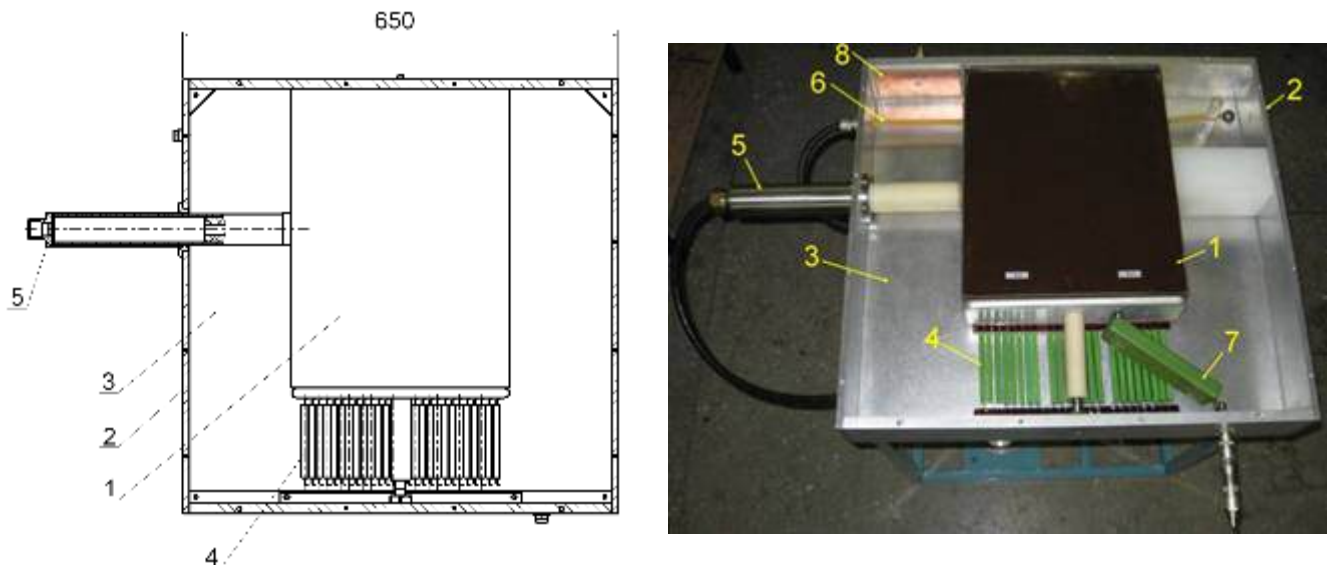


Рисунок 3.6 – Стенд для испытания секций: 1 – секция; 2 – корпус стенда; 3 – изоляция из оргстекла; 4 – нагрузка; 5 – высоковольтный ввод; 6 – пусковой проводник в полиэтиленовой изоляции; 7 – резистивный делитель напряжения на нагрузке; 8 – емкостной датчик пускового напряжения

Блок-схема стенда дана на рисунке 3.7. Конденсаторы секции  $C$  заряжаются от высоковольтного источника питания (1) напряжением положительной полярности  $U_0$ . От генератора запускающих импульсов (2) импульс напряжения отрицательной полярности подается на разрядник секции  $S$ . Срезающий разрядник  $P$  на выходе пускового кабеля предназначен для ограничения длительности пускового импульса с целью улучшения условий работы изоляции пускового проводника. При срабатывании разрядника  $S$  конденсаторы секции  $C$  разряжаются через нагрузку  $L_{load}$ ,  $R_{load}$ . Параметры нагрузки выбираются в зависимости от задачи исследования.

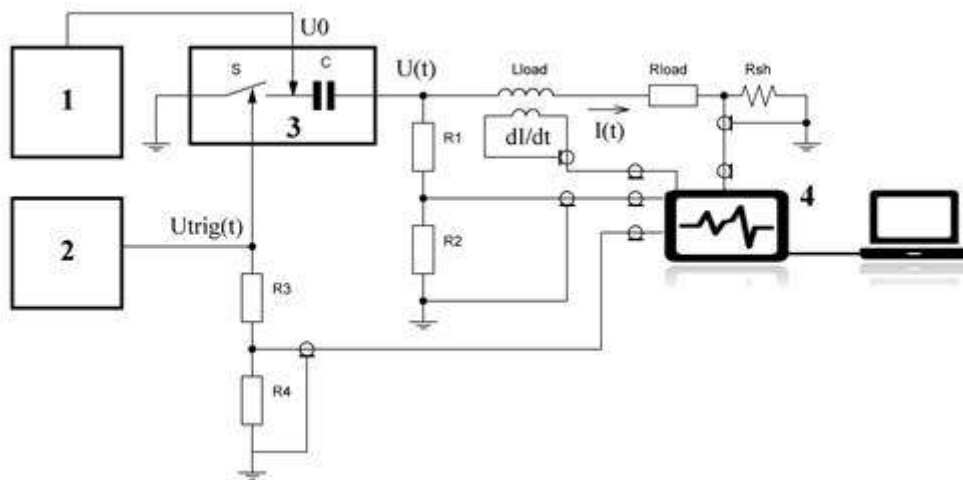


Рисунок 3.7 – Схема стенда для испытаний секций: 1– высоковольтный источник питания; 2 – генератор запускающих импульсов; 3– секция; 4 – осциллограф

На блок-схеме стенда приведено расположение регистрационных датчиков. Система регистрации включает в себя резистивный делитель  $R_1$ – $R_2$  напряжения на нагрузке  $U(t)$ , резистивный шунт  $R_{sh}$  ( $R_{sh} \ll R_{load}$ ) тока разряда секции, индуктивный датчик производной тока разряда  $dI/dt$  и резистивный (или емкостной) делитель  $R_3$ – $R_4$  пускового импульса напряжения  $U_{trig}(t)$ . Сигналы регистрируются цифровым осциллографом (4) Tektronix TDS3054C с полосой пропускания 500 МГц.

Ток нагрузки, кроме непосредственного измерения резистивным шунтом, рассчитывался численным интегрированием из сигнала производной тока с индуктивного датчика, а также из осциллограммы напряжения на нагрузке  $U(t)$ :

$$I(t) = \frac{1}{L_{load}} \exp\left(-t \frac{R_{load}}{L_{load}}\right) \int_0^t U(t) \exp\left(t \frac{R_{load}}{L_{load}}\right) dt, \quad (3.6)$$

где  $L_{load}$  – индуктивность нагрузки;

$R_{load}$  – сопротивление нагрузки.

Сопротивление нагрузки  $R_{load}$  измерялось цифровым прибором на частоте 10 кГц. Индуктивность нагрузки  $L_{load}$  предварительно оценивалась из геометрических размеров и корректировалась в процессе вычисления тока с использованием (3.6).

По току рассчитывались мощность и выделившаяся в нагрузке энергия:

$$W(t) = I(t)^2 R_{load}, \quad (3.7)$$

$$E(t) = \int_0^t P(t) dt, \quad (3.8)$$

### 3.3.2 Электрические параметры секций

Точное значение емкости накопителя секции  $C_B$  определялось с помощью измерителя иммитанса Е7-23М. Эквивалентные индуктивность  $L_B$  и сопротивление  $R_B$  секции рассчитывались из осциллограммы тока короткого замыкания ( $R_{load}=0$ ) с использованием выражений (3.4) и (3.5). В опыте короткого замыкания зарядное напряжение составляло  $U_0=65$  кВ, а два зазора в разряднике закорачивались. Таким образом, в разряднике использовалось пять зазоров суммарной длиной 3 см, средняя напряженность электрического поля в зазоре составляла 21.7 кВ/см, как в варианте семизазорного разрядника при зарядном напряжении секции  $U_0 \approx 91$  кВ.

Пример осциллограмм тока короткого замыкания трех секций приведен на рисунке 3.8. В таблице 3.3 обобщены эквивалентные параметры секций, рассчитанные из осциллограмм. Эти данные представляют собой усредненный результат 20 измерений для каждой из секций. Первый полупериод разряда не учитывался с целью минимизации влияния переходной коммутационной характеристики разрядника. Помимо эквивалентных электрических параметров  $C_B$ ,  $L_B$ ,  $R_B$  в таблице приведены величины волнового сопротивления  $\rho=(L_B/C_B)^{1/2}$  и временной постоянной  $\tau=(L_B \cdot C_B)^{1/2}$  секций.



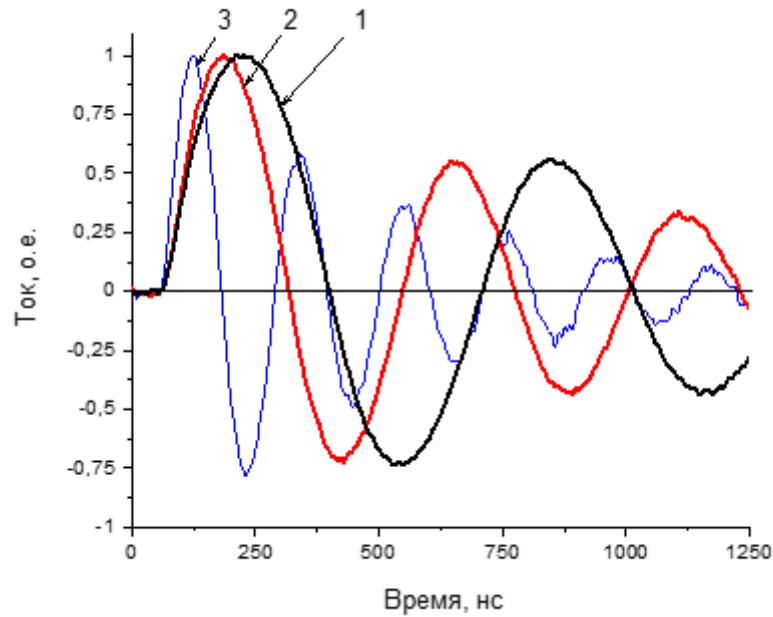


Рисунок 3.8 – Экспериментальные осциллограммы тока короткого замыкания секций при зарядном напряжении  $U_0=65$  кВ: 1– секция 160 нФ (4 конденсатора СВВ94), 2– секция 80 нФ (2 конденсатора GA35426), 3– секция 16 нФ (2 конденсатора GA35436)

Таблица 3.3 – Эквивалентные параметры секций:  $C_B$ ,  $L_B$ ,  $R_B$  – емкость, индуктивность и сопротивление, соответственно

	$C_B$ , нФ	$L_B$ , нГн	$R_B$ , Ом	$\rho=(L_B/C_B)^{1/2}$ , Ом	$\tau=(L_B \cdot C_B)^{1/2}$ , нс
Секция 160 нФ	160	50	0.1	0.6	89
Секция 80 нФ	80	54	0.2	0.8	66
Секция 16 нФ	16	59	0.3	1.9	31

Временная постоянная разряда секции 160 нФ увеличилась по сравнению с временной постоянной единичного конденсатора в 2.4 раза. Для секций 80 нФ и 16 нФ это увеличение составило  $\approx 2$  раза.

При переходе от секции 160 нФ с энергозапасом 800 Дж к секции 16 нФ с энергозапасом на порядок ниже (80 Дж) волновое сопротивление разрядного контура секции  $(L_B/C_B)^{1/2}$  возрастает с 0.6 Ом до 1.9 Ом, а временная постоянная разряда  $(L_B \cdot C_B)^{1/2}$  снижается с 89 нс до 31 нс.

Секция 80 нФ идентична секции ступени LTD-100 с масляной изоляцией (см. подраздел 1.2.3) по числу и типу конденсаторов и, следовательно, запасаемой энергии. Секция 16 нФ идентична секции ступени LTD-16-8 с масляной изоляцией (см. подраздел 1.2.3) по числу и типу конденсаторов и, следовательно, запасаемой энергии. Сравнение

соответствующих секций показывает, что при переходе от масляной изоляции к воздушной удалось сохранить временную постоянную разряда.

### 3.3.3 Параметры выходных импульсов секций

Параметры выходного импульса секций получены при разряде на нагрузку, изготовленную из параллельно соединенных резисторов ТВО-10, 27 Ом. Индуктивность нагрузки составляла около 8 нГн. Сопротивление нагрузки варьировалось за счет изменения числа параллельных резисторов и подбиралось из критерия реализации мощности разряда, близкой к максимальной.

Для линейной электрической цепи сопротивление нагрузки, соответствующее максимальной мощности разряда, определяется выражением [26]:

$$R_{opt} = 1.1 \sqrt{\frac{L_B}{C_B}} + 0.8R_B. \quad (3.9)$$

Для контура секции, содержащего нелинейный элемент – искровой разрядник, выражение (3.9) может быть использовано лишь для предварительной оценки.

#### 3.3.3.1 Секция 160 нФ

Параметры выходных импульсов секции 160 нФ для трех нагрузок и двух зарядных напряжений 85 и 95 кВ обобщены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры импульсов секции 160 нФ:  $R_{load}$  – сопротивление нагрузки,  $U_0$  – зарядное напряжение;  $I_m$  – амплитуда тока;  $t_{1-9}$  – фронт импульса тока по уровню (0.1–0.9);  $I_2/I_m \times 100$  % – отношение амплитуд второй полуволны импульса к первой, выраженное в процентах;  $W$  – мощность вывода энергии в нагрузку;  $E$  – энергия, переданная в нагрузку в течение первого полупериода

$R_{load}$ , Ом	$U_0$ , кВ	$I_m$ , кА	$t_{1-9}$ , нс	$I_2/I_m$ , %	$W$ , ГВт	$E$ , Дж
0.46	85	60	95	21	1.7	330
0.76	85	51	90	10	2.0	410
	95	57	65	12	2.5	520
1.04	85	44	78	1	2.1	442
	95	50	65	2	2.6	550

Максимальная мощность разряда секции 160 нФ реализуется на нагрузке с сопротивлением  $R_{load}$  около 1 Ом. Пример осциллограмм в режиме разряда секции при зарядном напряжении  $U_0=95$  кВ с выходной мощностью, близкой к предельной, демонстрирует рисунок 3.9. В нагрузку выводится  $\approx 80\%$  энергии от запасаемой в накопителе за характерное время 215 нс (время между уровнями (0.1–0.9) от амплитудного значения). Пиковая мощность вывода энергии составляет 2.6 ГВт, амплитуда тока разряда – около 50 кА, фронт импульса по уровню (0.1–0.9) от амплитудного значения  $t_{1-9} \approx 65$  нс.

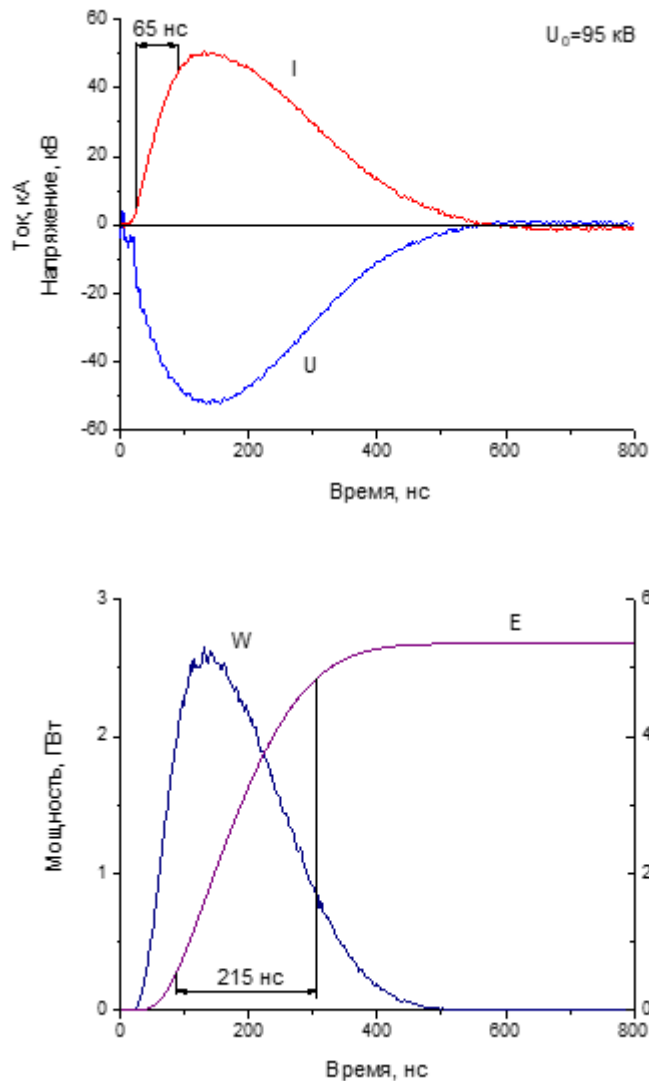


Рисунок 3.9 – Осциллограммы тока  $I$ , напряжения на нагрузке  $U$ , выходной мощности  $W$  и энергии в нагрузке  $E$  при разряде секции 160 нФ с зарядным напряжением  $U_0=95$  кВ на нагрузку с сопротивлением  $R_{load} \approx 1$  Ом

## 3.3.3.2 Секция 80 нФ

Максимальная мощность разряда секции 80 нФ реализуется на нагрузке с сопротивлением  $R_{load}$  около 1.7 Ом. Пример осциллограмм разряда секции при зарядном напряжении  $U_0=100$  кВ с выходной мощностью, близкой к предельной, демонстрирует рисунок 3.10. В нагрузку выводится  $\approx 80\%$  энергии от запасаемой в накопителе за характерное время 165 нс (время между уровнями (0.1–0.9) от амплитудного значения). Пиковая мощность вывода энергии составляет  $\sim 2.2$  ГВт, амплитуда тока разряда – около 35 кА, фронт импульса по уровню (0.1–0.9) от амплитудного значения  $t_{1-9} \sim 45$  нс.

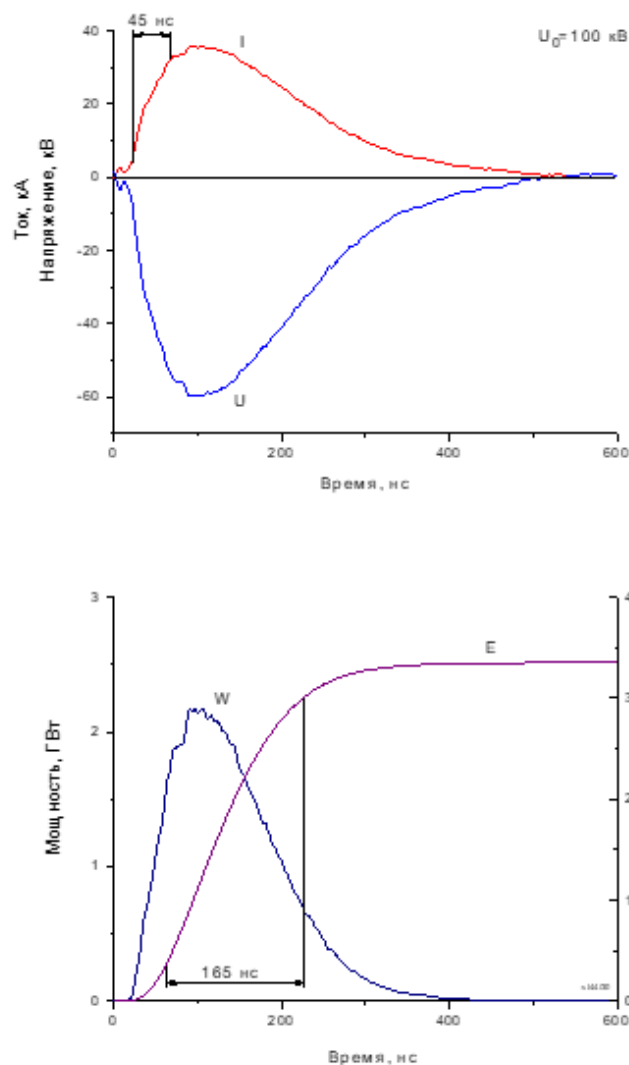


Рисунок 3.10 – Осциллограммы тока  $I$ , напряжения на нагрузке  $U$ , выходной мощности  $W$  и энергии в нагрузке  $E$  при разряде секции 80 нФ с зарядным напряжением  $U_0=100$  кВ на нагрузку с сопротивлением  $R_{load} \approx 1.7$  Ом

В таблице 3.5 приведены параметры импульсов для нагрузок с сопротивлением 0.95 Ом и 1.7 Ом при изменении зарядного напряжения секции от 60 до 100 кВ.

Таблица 3.5 – Параметры импульсов секции 80 нФ для нагрузок 0.95 Ом, 8 нГн и 1.7 Ом, 8 нГн:  $U_0$  – зарядное напряжение;  $I_m$  – амплитуда тока;  $t_{1-9}$  – фронт импульса тока по уровню (0.1–0.9);  $I_2/I_m \times 100$  % – отношение амплитуд второй полуволны импульса к первой, выраженное в процентах;  $W$  – мощность вывода энергии в нагрузку;  $E$  – энергия, переданная в нагрузку в течение первого полупериода

Нагрузка	$U_0$ , кВ	$I_m$ , кА	$t_{1-9}$ , нс	$I_2/I_m$ , %	$W$ , ГВт	$E$ , Дж
0.95 Ом 8 нГн	60	26	70	9	0.7	96
	70	32	68	9	1.0	134
	80	38	65	9	1.3	182
	90	43	62	9	1.8	238
	100	48	62	9	2.2	295
1.70 Ом 8 нГн	60	20	64	0	0.7	112
	70	24	58	0	1.0	157
	80	28	55	0	1.3	208
	90	32	50	0	1.8	272
	100	36	45	0	2.2	336

Чтобы оценить влияние на параметры выходного импульса дополнительной индуктивности, возникающей при работе секции в составе ЛТД ступени, выполнены эксперименты с нагрузкой с сопротивлением 1.16 Ом и увеличенной индуктивностью с 8 нГн до 40 нГн. В этом варианте нагрузка была изготовлена из фольги из нержавеющей стали. Результаты этих экспериментов даны в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Параметры импульсов секции 80 нФ для нагрузки 1.16 Ом, 40 нГн:  $U_0$  – зарядное напряжение;  $I_m$  – амплитуда тока;  $t_{1-9}$  – фронт импульса тока по уровню (0.1–0.9);  $I_2/I_m \times 100$  % – отношение амплитуд второй полуволны импульса к первой, выраженное в процентах;  $W$  – мощность вывода энергии в нагрузку;  $E$  – энергия, переданная в нагрузку в течение первого полупериода

Нагрузка	$U_0$ , кВ	$I_m$ , кА	$t_{1-9}$ , нс	$I_2/I_m$ , %	$W$ , ГВт	$E$ , Дж
1.16 Ом 40 нГн	60	23	65	11	0.6	106
	70	27	65	11	0.9	149
	80	33	62	11	1.2	204
	90	37	60	11	1.6	263
	100	42	59	10	2.1	330

Дополнительно проведено исследование влияния числа каналов в разряднике на характеристики разряда секции. В таблице 3.7 представлены параметры импульсов при изменении числа каналов в разряднике  $N$  от 1 до 6.

Результаты исследований секции, представленные в таблицах 3.5–3.7, дают представление о влиянии зарядного напряжения и числа каналов на эффективность вывода энергии из емкостного накопителя, мощность и ток в нагрузке.

Таблица 3.7 – Параметры импульсов секции 80 нФ при зарядном напряжении 100 кВ в зависимости от числа каналов в разряднике:  $R_{load}$  – сопротивление нагрузки,  $N$  – число каналов;  $I_m$  – амплитуда тока;  $t_{1-9}$  – фронт импульса тока по уровню (0.1–0.9);  $I_2/I_m \times 100$  % – отношение амплитуд второй полуволны импульса к первой, выраженное в процентах;  $W$  – мощность вывода энергии в нагрузку;  $E$  – энергия, переданная в нагрузку в течение первого полупериода

Нагрузка	$N$	$I_m$ , кА	$t_{1-9}$ , нс	$I_2/I_m$ , %	$W$ , ГВт	$E$ , Дж
0.95 Ом 8 нГн	6	48	62	9	2.2	295
	4	46	69	12	2.0	286
	2	44	73	16	1.8	285
	1	39	100	25	1.4	280
1.7 Ом 8 нГн	6	36	45	0	2.2	336
	4	34	60	0	2.0	328
	2	33	63	0	1.8	324
	1	31	85	6	1.6	321
1.16 Ом 40 нГн	6	42	65	10	2.1	330
	4	40	66	12	1.9	318
	2	39	68	16	1.8	319
	1	36	80	22	1.5	317

### 3.3.3.3 Секция 16 нФ

В таблице 3.8 приведены параметры импульсов секции 16 нФ для четырех нагрузок с различными сопротивлениями при изменении зарядного напряжения от 80 до 100 кВ.

Таблица 3.8 – Параметры импульсов секции 16 нФ:  $R_{load}$  – сопротивление нагрузки,  $U_0$  – зарядное напряжение;  $I_m$  – амплитуда тока;  $t_{1-9}$  – фронт импульса тока по уровню (0.1–0.9);  $I_2/I_m \times 100$  % – отношение амплитуд второй полуволны импульса к первой, выраженное в процентах;  $W$  – мощность вывода энергии в нагрузку;  $E$  – энергия, переданная в нагрузку в течение первого полупериода

$R_{load}$ , Ом	$U_0$ , кВ	$I_m$ , кА	$t_{1-9}$ , нс	$I_2/I_m$ , %	$W$ , ГВт	$E$ , Дж
0.95	80	22	35	28	0.5	28.5
	90	26	33	28	0.7	38.4
	100	30	33	29	0.9	51.0
1.7	80	19	31	8	0.6	35.1
	90	22	30	8	0.8	47.3
	100	25	30	9	1.1	59.6
2.0	80	18	30	4	0.7	36.9
	90	21	29	4	0.9	48.5
	100	24	29	4	1.1	62.5
2.5	80	16	26	0	0.6	37.2
	90	18	26	0	0.8	49.3
	100	21	25	0	1.1	63.5

Максимальная мощность разряда секции 16 нФ реализуется на нагрузке с сопротивлением около 2 Ом. На рисунке 3.11 показаны примеры осциллограмм разряда секции с выходной мощностью, близкой к предельной, при зарядном напряжении  $U_0=100$  кВ. Для секции 16 нФ характерное время вывода энергии из емкостного накопителя на нагрузку снизилось до 60 нс. При этом пиковая мощность вывода энергии составила 1.1 ГВт, амплитуда тока разряда – более 20 кА, фронт импульса по уровню (0.1–0.9) от амплитудного значения –  $t_{1-9} \approx 25$  нс.

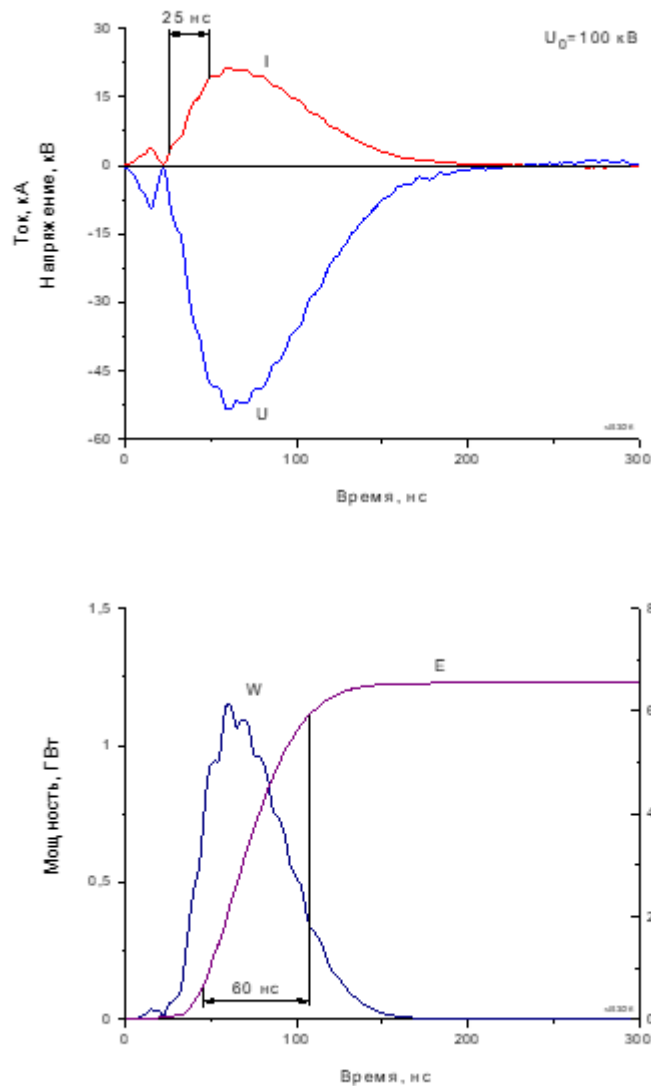


Рисунок 3.11 – Осциллограммы тока  $I$ , напряжения на нагрузке  $U$ , выходной мощности  $W$  и энергии в нагрузке  $E$  при разряде секции 16 нФ с зарядным напряжением  $U_0=100$  кВ на нагрузку с сопротивлением  $R_{load} \approx 2.5$  Ом

### 3.4 Ресурс секций

Согласно данным производителя, ресурс конденсаторов серий GA и СВВ94 составляет  $5 \cdot 10^4$  включений при зарядном напряжении 100 кВ и реверсе импульса разряда не более 10 %. При этом полагается, что конденсаторы работают в трансформаторном масле.

Оставался открытым вопрос о ресурсе конденсаторов в случае их заливки в жесткий корпус из компаунда на основе эпоксидной смолы, для ответа на который были проведены ресурсные испытания конденсаторов СВВ94 в составе секций 160 нФ. Помимо информации о ресурсе конденсаторов, эти испытания позволили получить данные по ресурсу разрядника и секции в целом.

Конденсаторы перед заливкой в корпус секции прошли входной контроль с целью проверки соответствия параметров конденсаторов паспортным характеристикам и подтверждения их пригодности к использованию. Процедура входного контроля:

- 1) Измерялись емкость конденсаторов  $C_0$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $tg \delta$  с помощью измерителя иммитанса E7-23M;
- 2) Производилось 10 импульсов заряд-разряд на напряжении 70 кВ, 10 импульсов заряд-разряд на напряжении 80 кВ и 10 импульсов заряд-разряд на напряжении 90 кВ;
- 3) Конденсаторы выдерживались в течение 1 минуты в заряженном состоянии при зарядном напряжении 100 кВ;
- 4) Повторно измерялись емкость конденсаторов и тангенс угла диэлектрических потерь.

После прохождения входного контроля конденсаторы в составе секции поступали на ресурсные испытания. Блок-схема ресурсных испытаний и система регистрации аналогична приведенной на рисунке 3.7. Ресурс конденсаторов и секции исследован с использованием постоянной резистивной нагрузки 0.9 Ом при реверсе импульса напряжения  $\approx 10\%$  (рисунок 3.12). Зарядное напряжение составляло 90 кВ и 95 кВ, средняя скорость нарастания пускового импульса 0.7 кВ/нс. Амплитуда тока разряда секции составляла  $\approx 50$  кА, амплитуда тока через каждый из четырех конденсаторов  $\approx 12.5$  кА, амплитуда тока через каждый из шести каналов разрядника  $\approx 8.3$  кА. В



среднем в день выполнялось около 2 000 включений. Частота следования циклов «заряд / разряд» была 0.1 Гц. Разрядник непрерывно продувался осушенным воздухом.

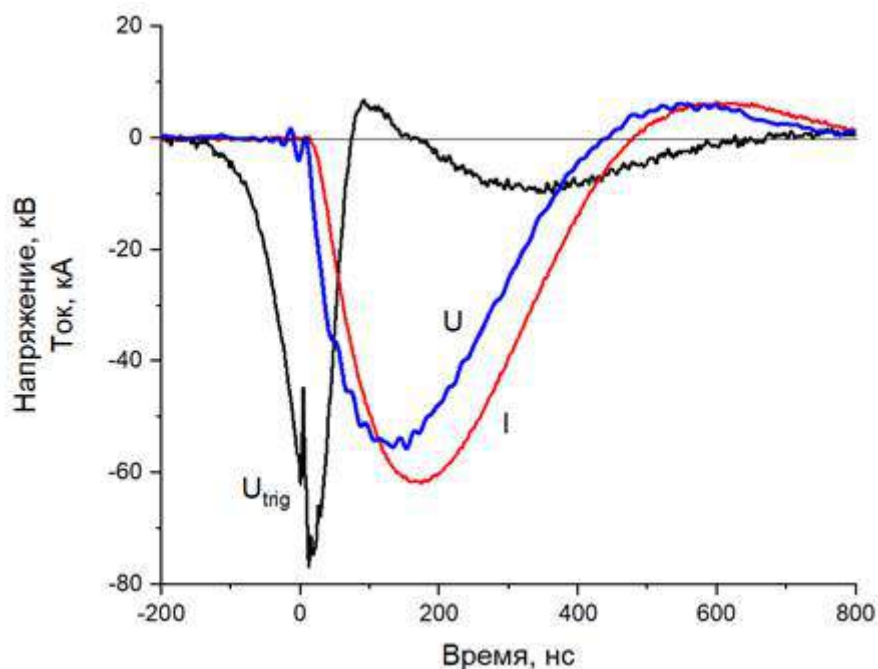


Рисунок 3.12 – Пример осциллограмм импульсов пускового напряжения  $U_{trig}$ , напряжения  $U$  и тока  $I$  разряда секции 160 нФ в ресурсных испытаниях. Сопротивление нагрузки 0.9 Ом. Зарядное напряжение  $U_0=95$  кВ. Средняя скорость нарастания пускового импульса 0.7 кВ/нс

В случае выхода из строя конденсатора он удалялся и испытания продолжались с оставшимися конденсаторами в секции. При этом сопротивление нагрузки корректировалось (увеличивалось) для сохранения реверса импульса напряжения на уровне 10 %.

Результаты ресурсных испытаний двух секций обобщены в таблицах 3.9 и 3.10. С первой секцией всего выполнено 90 570 включений, из них 45 411 включений при зарядном напряжении 90 кВ и 45 159 включений при зарядном напряжении 95 кВ. После импульса № 90 570 произошел внутренний пробой одного конденсатора. Корпус секции треснул. Произошло повреждение корпуса соседнего конденсатора. Один из целых конденсаторов с наработкой 90 570 импульсов был установлен с тремя новыми конденсаторами во вторую секцию.

Вторая секция испытывалась при зарядном напряжении только 95 кВ. Конденсатор из первой секции с исходной наработкой 90 570 импульсов вышел из строя через 6 977 импульсов. Его суммарная наработка составила 97 547 импульсов.

Следующий конденсатор секции вышел из строя через 109 449 импульсов. При этом разрушились корпуса и двух других конденсаторов секций.

Таблица 3.9 – Результаты ресурсных испытаний конденсаторов секции № 1 при зарядном напряжении  $U_0=90$  кВ и 95 кВ

№ конденсатора	Число циклов «заряд / разряд» до выхода из строя
1	90 570
2	Не менее 90 570
3	Не менее 90 570
4	Не менее 90 570

Таблица 3.10 – Результаты ресурсных испытаний конденсаторов секции № 2 при зарядном напряжении  $U_0=95$  кВ

№ конденсатора	Число циклов «заряд / разряд» до выхода из строя
1	97 547
2	109 449
3	Не менее 109 449
4	Не менее 109 449

Проведенные испытания показали, что конденсаторы в жестком корпусе из эпоксидного компаунда способны обеспечивать до  $10^5$  включений при зарядном напряжении 90–95 кВ в режиме разряда с реверсом 10 % и амплитуде тока через конденсатор  $\approx 12.5$  кА.

В течение всей серии из  $\sim 10^5$  включений со второй секцией разрядник секции не обслуживался. Уменьшение диаметра электродов разрядника из-за уноса материала электродов и, соответственно, увеличение межэлектродных зазоров за всю серию составило около 0.2 мм. На рисунке 3.13 приведены данные по времени задержки запуска разрядника в каждом импульсе во всей серии ресурсных испытаний и джиттер, рассчитанный в дневных сериях импульсов. По мере наработки задержка запуска постепенно возрастает; за серию из  $\sim 10^5$  включений увеличение составило около 50 нс. Джиттер разрядника в течении  $8 \cdot 10^4$  импульсов сохранялся на уровне  $\approx 5$  нс. Экспериментальные данные подтверждают работоспособность разрядника без

обслуживания в исследованном режиме в течение почти всего ресурса конденсаторов секции.

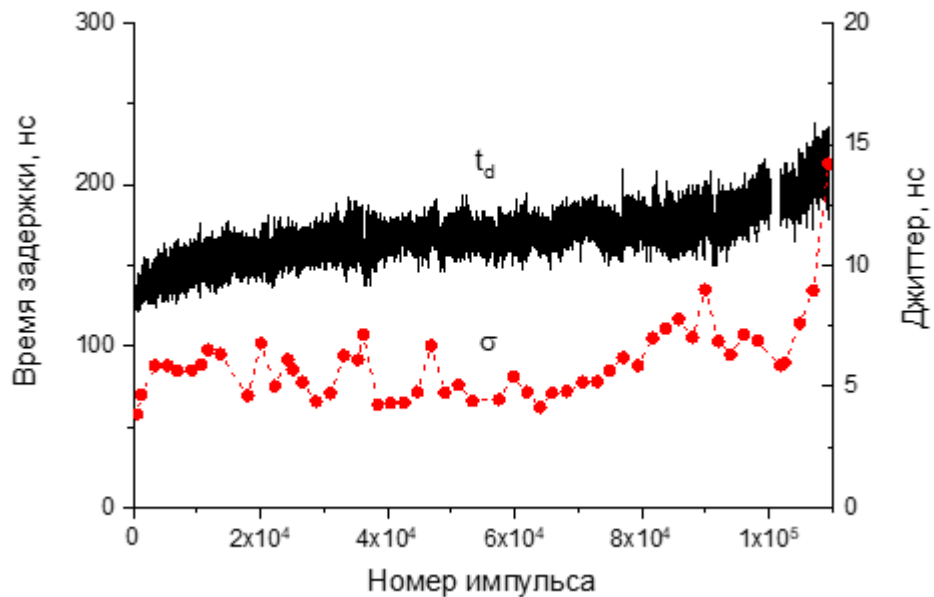


Рисунок 3.13 – Время задержки  $t_d$  запуска разрядника относительно импульса пускового напряжения и джиттер запуска  $\sigma$  в дневных сериях

### 3.5 Моделирование разряда секций, потери энергии в разряднике

При работе в воздухе атмосферного давления и длительности формируемого импульса порядка 100 нс коммутационная характеристика искрового разрядника влияет на параметры генерируемого импульса, приводит к значительной потере энергии в разряднике и снижению мощности вывода энергии из емкостного накопителя в нагрузку [129]. Поэтому для проведения электротехнических расчетов переходного процесса разряда проектируемых генераторов необходимо учитывать эту коммутационную характеристику. Действительно, например, в случае идеальной коммутационной характеристики разрядника в «критическом» режиме разряда (переходной режим между периодическим и аperiodическим режимами разряда) секции 80 нФ можно было бы реализовать мощность импульса на нагрузке  $W_m = 0.27U_0^2 \sqrt{C_B/L_B} \approx 3.3$  ГВт в момент времени  $t_m \approx \sqrt{L_B C_B} \approx 66$  нс, где значения  $C_B$  и  $L_B$  взяты из таблицы 3.3. Однако результаты экспериментов (таблица 3.5) показывают, что реальная коммутационная характеристика разрядника приводит к существенному снижению выходной мощности (в  $\sim 1.5$  раза) и затягиванию фронта импульса (также в  $\sim 1.5$  раза).

Схема замещения разрядного контура секции с нелинейным элементом  $R_S(t)$ , моделирующим коммутационную характеристику разрядника, приведена на рисунке 3.14. Параметры схемы  $C_B$ ,  $L_B$  и  $R_B$  приведены в таблице 3.3. В общем случае разрядник характеризуется переменными во времени сопротивлением  $R_S(t)$  и индуктивностью  $L_S(t)$ , которая входит в индуктивность  $L_B$ . Однако, как будет показано ниже, индуктивность разрядника можно считать постоянной.

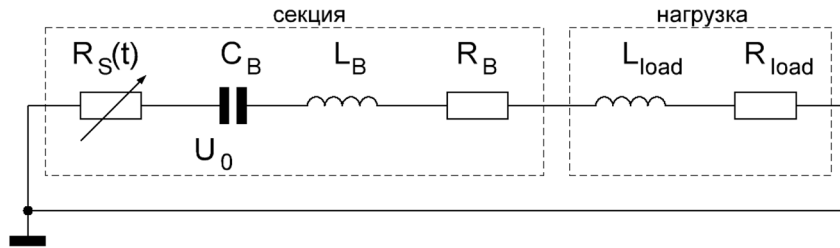


Рисунок 3.14 – Электрическая схема замещения разрядного контура секции ЛТД ступени

В работе искрового разрядника выделяют две стадии: предпробойную и непосредственно коммутацию. Для моделирования работы разрядника представляет интерес вторая стадия, когда искровой канал сформировался и происходит спад напряжения на разряднике от значения, близкого к зарядному напряжению емкостного накопителя  $U_0$ , до значения, много меньшего  $U_0$ . Учет коммутационной характеристики газового промежутка предполагает замещение разрядника источником напряжения со спадающей во времени характеристикой. Простой зависимостью напряжения источника от времени является экспонента

$$U(t) = U_0 \exp(-t/\tau_R), \quad (3.10)$$

где  $\tau_R$  – постоянная времени спада напряжения на промежутке. Постоянная времени  $\tau_R$ , нс, определяется полуэмпирическим выражением [130]:

$$\tau_R = k \cdot Z^{-1/3} (0.1 E_0)^{-4/3} \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/2}, \quad (3.11)$$

где  $k=88$ – эмпирическая константа, нс·(Ом)<sup>1/3</sup>·(кВ/см)<sup>4/3</sup>;

$Z$ – волновое сопротивление разрядного контура, Ом;

$E_0$ – напряженность электрического поля, кВ/см;

$\rho/\rho_0$ – отношение плотности газа к плотности при нормальных температуре и давлении.

Основанием для использования такого подхода является предположение о слабом влиянии волнового сопротивления (тока) разрядного контура на время коммутации.

Замена нелинейного сопротивления разрядника источником напряжения с экспоненциально спадающей характеристикой удобна тем, что облегчает расчет переходного процесса в разрядном контуре, а также не требует определения начального сопротивления разрядника в момент начала коммутации. Недостатком такого подхода является ограниченный диапазон применимости по волновому сопротивлению контура и току разряда.

Учесть влияние тока разряда на сопротивление искрового разрядника позволяет выражение, обобщающее известные модели искры [131]:

$$R_{CH}(t) = \frac{\ell}{k \left[ \int_{t_p}^t I_{CH}(t)^\gamma dt + K \right]^\delta}, \quad (3.12)$$

где  $I_{CH}$  – ток через канал разряда;

$\ell$  – длина зазора;

$k$ ,  $\gamma$  и  $\delta$  – параметры, определяемые моделями разряда;

$K$  – константа, определяющая начальное сопротивление искры.

Значения параметров  $k$ ,  $\gamma$  и  $\delta$  для разных моделей приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Значения параметров в выражении (3.12) для различных моделей

Модель	$\gamma$	$\delta$	$k$	Для воздуха
Теплера	1	1	$1/k_T$	$k_T=(1.5-3) \cdot 10^{-4}$ В·с/см
Ромпе-Вейцеля	2	1/2	$\sqrt{2a/p}$	$a=(0.8-1)$ атм·см <sup>2</sup> /(с·В <sup>2</sup> )
Брагинского	2/3	1	$(4\pi\sigma^2/\rho_0\xi)^{1/3}$	$\sigma \approx 3 \cdot 10^2$ (Ом·см) <sup>-1</sup> , $\xi \approx 4.5$
Мартина	4/3	3/5	$40d^{1/5}(\rho/\rho_0)^{-0.3}$	$\rho_0=1.2 \cdot 10^5$ кг/м <sup>3</sup>

Модель Ромпе-Вайцеля дает хорошее согласие с экспериментом на фронте коммутации, в наиболее крутой его части. Модель Теплера удовлетворительно описывает более пологий участок коммутации. Модель Брагинского разработана для коммутации токов порядка  $10^4$  А и более, а модель Мартина – для многоискровой коммутации в сжатом газе.

Константа  $K$  в выражении (3.12) определяет сопротивление искры  $R_0$  в начальный момент времени  $t=0$ , за который берется момент переключения стримером

межэлектродного зазора. Величину  $R_0 = R_{ch}(0)$  принято определять как сопротивление искры в момент, когда значение тока искры составляет 1–2 % от тока короткого замыкания заряженной линии или  $LC$ -контура. Учитывая, что эксперименты по исследованию предпробойной стадии проводились на заряженных кабелях с волновым сопротивлением 50–75 Ом, имеем  $R_0$  более 2.5 кОм. В работах [131, 132] начальное сопротивление искры определяется начальным радиусом искрового канала после окончания стримерной стадии. Значение радиуса образовавшегося канала рассчитывается исходя из диффузного механизма расширения стримера

$$r_0 = \sqrt{4Dt_0}, \quad (3.13)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии электронов;

$t_0$  – время формирования канала.

Для воздуха  $D \approx 1.7 \cdot 10^3$  см<sup>2</sup>/с, а величина  $t_0$ , нс, оценивается из эмпирического соотношения

$$t_0 = 3.5 + 150 \frac{\ell}{E_0}, \quad (3.14)$$

где  $\ell$  – длина промежутка, см;

$E_0$  – напряженность электрического поля, кВ/см.

Например, в промежутке  $\ell \sim 1$  см и пробое при напряженности поля в диапазоне от статического пробивного до двукратного перенапряжения  $E_0 = 30–60$  кВ/см начальный радиус искрового канала согласно (3.13) составляет  $r_0 \approx 5 \cdot 10^{-3}$  см.

При токе через канал  $I \sim 10^4$  А и характерной длительности импульса  $\sim 10^{-8}$  с удовлетворительное согласие с экспериментом дает гидродинамическая теория расширения искрового канала [134], развитая С.И. Брагинским [135]. В частности, положительные результаты проверки данной теории получены в экспериментах [132, 133] при близких к нашим условиям работы разрядника. Модель Брагинского дает выражение для радиуса однородного (давление, температура и плотность постоянны вдоль радиуса) расширяющегося канала с допущением постоянной проводимости

$$r(t) = r(0) + \left( \frac{4}{\rho_0 \pi^2 \xi \sigma} \right)^{1/6} \left( \int_0^t |I_{ch}(t)|^{2/3} dt \right)^{1/2}, \quad (3.15)$$

где  $\rho_0$  – плотность газа, в котором происходит разряд;

$\sigma$  – проводимость канала разряда;

$\xi$  – безразмерная величина.

Для воздуха при нормальных условиях  $\rho_0=1.2 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>,  $\xi \approx 4.5$  [130]. Проводимость канала разряда  $\sigma=300$  (Ом·см)<sup>-1</sup> [133]. Начальный радиус канала, начиная с которого расширение идет по закону (3.15), согласно выше приведенной оценке  $r(0)=r_0 \approx 5 \cdot 10^{-3}$  см. Сопротивление искрового канала с учетом (3.15):

$$R_{CH}(t) = \frac{\ell}{\pi r(t)^2 \sigma} = \frac{\ell}{\left(\frac{4\pi\sigma^2}{\rho_0\xi}\right)^{1/3} \int_0^t |I_{CH}(t)|^{2/3} dt + \pi\sigma r(0)^2}, \quad (3.16)$$

где  $\ell=42$  мм – длина канала в нашем разряднике.

Нижняя граница применимости модели определяется тем, что для значительной ионизации температура в канале должна быть более 1 эВ. Для этого ток в канале  $I$  должен быть не слишком мал и нарастать за достаточно короткое время [135]  $I[\text{kA}] \gg 10^{-2} \cdot t^{3/4}$ , где  $t$  – время в мкс.

Верхняя граница применимости модели определяется требованием малости магнитного давления по сравнению с газокинетическим. В воздухе при атмосферном давлении:  $I < 250$  кА [135].

Выражение (3.16) для системы из  $N$  параллельных искровых каналов в многоканальном разряднике примет вид:

$$R_S(t) = \frac{R_{CH}(t)}{N}. \quad (3.17)$$

Для моделирования индуктивности разрядника используется геометрия канала разрядника, показанная на рисунке 2.4. Индуктивность складывается из двух составляющих: переменной индуктивности расширяющихся каналов искры и постоянной индуктивности электродов разрядника.

Индуктивность электродов одного канала  $L_1$  оценивается по формуле индуктивности однопроводной линии с землей в качестве обратного токопровода при высокой частоте [136]:

$$L_1[\text{Гн}] = 0.5l \frac{\mu_0}{2\pi} \operatorname{arch} \left( \frac{4h^2 - 2r_1^2}{2r_1^2} \right), \quad (3.18)$$

где  $l$  – длина, м;

$r_1$  – радиус линии, равный половине радиуса шара, м;

$h=35 \cdot 10^{-3}$  м – расстояние от оси линии до обратного токопровода.

При  $l=8 \times 22$  м)=176 мм из (3.18) получаем  $L_1=89 \cdot 10^{-9}$  Гн.

Динамическая индуктивность канала разряда  $L_2(t)$  оценивается по формуле для индуктивности однопроводной линии при высокой частоте с землей в качестве обратного токопровода и при расстоянии до земли  $h$  много больше радиуса линии [131]:

$$L_2(t) [\text{Гн}] = 0.5 \ell \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2h}{r(t)} - \frac{r(t)^2}{4h^2} - \frac{3r(t)^4}{32h^4} \right), \quad (3.19)$$

где  $r(t)$  – радиус искрового канала находится по выражению (3.15).

На рисунке 3.15 представлен пример расчета радиуса канала искры  $r(t)$  из (3.15) и экспериментальной кривой тока  $I(t)$ , пересчитанной на один канал, для режима разряда секции 80 нФ при  $U_0=100$  кВ и  $R_{load}=0.95$  Ом. Также на рисунке приведена зависимость полной индуктивности одного из шести каналов разрядника от времени  $L_{CH}(t) = L_1 + L_2(t)$ , рассчитанная с использованием зависимости  $r(t)$ . Из представленного расчета видно, что индуктивность одного канала разрядника изменяется в течение импульса в пределах 150–123 нГн.

Расчет индуктивного падения напряжения на разряднике показывает, что падение напряжения обусловлено составляющей  $L_{CH}(t) \cdot dI_{CH}(t)/dt$  (рисунок 3.16, кривая 1), где  $I_{CH}(t)$  – ток в одном канале. Составляющей, связанной с изменением индуктивности  $I_{CH}(t) \cdot dL_{CH}(t)/dt$  (рисунок 3.16, кривая 2), можно пренебречь. Для оценки индуктивного падения напряжения с достаточной точностью вместо динамической индуктивности  $L_{CH}(t)$  можно использовать постоянное значение  $L_{CH}=130$  нГн (рисунок 3.16, кривая 3). В этом случае индуктивность разрядника с шестью каналами  $L_S = L_{CH}/6$  составит около 22 нГн. Эта индуктивность входит в индуктивность  $L_B$ , приведенную в таблице 3.3, и дополнительно в схему замещения на рисунке 3.14 не вводится.

Аналогичным образом может быть оценена эквивалентная постоянная индуктивность канала разрядника для любого другого режима разряда по известному току разряда и числу параллельных каналов. Например, этот способ оценки можно применить к экспериментам с секцией 80 нФ, в которых число каналов в разряднике  $N$  варьировалось от 1 до 6. В таблице 3.12 приведены значения амплитуды тока в одном канале  $I_{CH}$ , расчетные значения радиуса канала  $r_E$  и индуктивности канала  $L_E$  к концу импульса тока, а также индуктивности единичного канала  $L_{CH}$ , используемые в качестве эквивалента при моделировании и полученные из условия  $L(t) \times dI_{CH}(t)/dt \approx L_{CH} \cdot dI_{CH}(t)/dt$ .



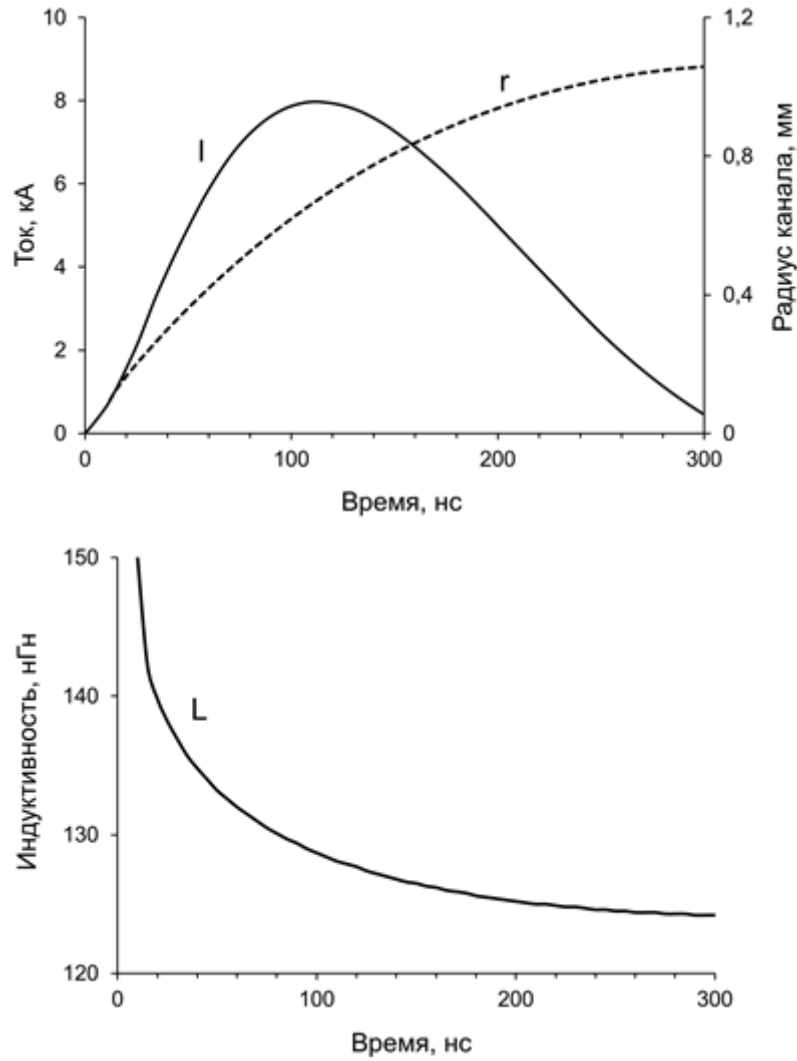


Рисунок 3.15 – Ток в одном канале  $I$ , радиус искрового канала  $r$  и полная индуктивность одного канала разрядника  $L_{CH}$

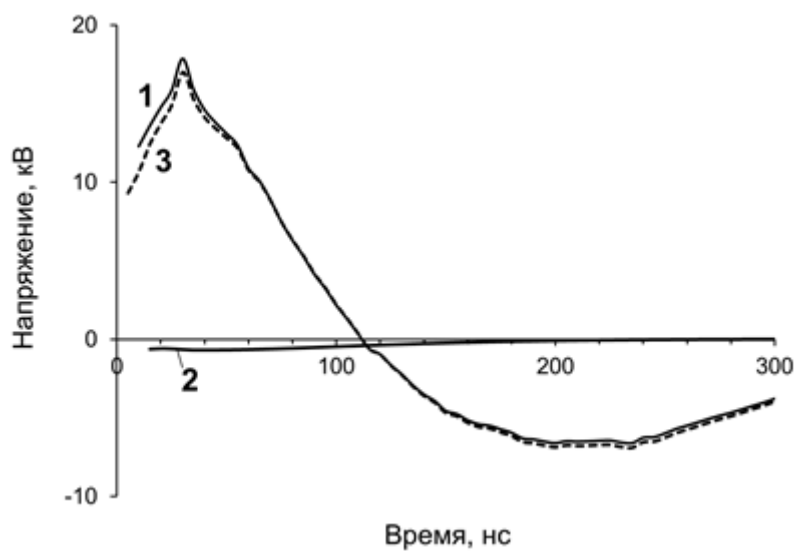


Рисунок 3.16 – Индуктивное падение напряжения на разряднике: 1 – напряжение  $L_{CH}(t) \cdot dI_{CH}(t)/dt$ ; 2 – напряжение  $I_{CH}(t) \cdot dL_{CH}(t)/dt$ ; 3 – напряжение  $(130 \text{ [нГн]} \cdot \frac{dI_{CH}(t)}{dt})$

Таблица 3.12 – Параметры одного канала разрядника при разряде секции 80 нФ на нагрузку 0.95 Ом

$N$	$I_{CH}$ , кА	$r_E$ , мм	$L_E$ , нГн	$L_{CH}$ , нГн
6	7.9	1.1	123	130
4	45.8	1.4	121	126
2	43.6	1.9	119	120
1	39.1	2.6	116	115

Расчет электрической схемы на рисунке 3.14 выполнялся в программах PSpice [137] и MicroCap [138]. Искровой разрядник замещается зависимым источником напряжения, управляемым током,  $U_S(t) = R_{CH}(t) \cdot I_{CH}(t)$ , где коммутационная характеристика  $R_{CH}(t) = f(I_{CH}(t))$  описывается выражением (3.16). Такая модель описывает падение напряжения на искровом канале разрядника после пробоя всех зазоров и окончания стримерной стадии.

Были выполнены расчеты разряда секций с варьированием числа каналов в разряднике, емкости секции, зарядного напряжения, сопротивления нагрузки. Во всех случаях получено хорошее совпадение экспериментальных и расчетных кривых при использовании значения проводимости канала разряда  $\sigma=300$  (Ом·см)<sup>-1</sup>. Ранее в [133] согласие с экспериментом также было получено при  $\sigma=300$  (Ом·см)<sup>-1</sup>.

Пример моделирования разряда секции 160 нФ на нагрузку 1 Ом приведен на рисунке 3.17. На рисунке 3.18 показаны примеры моделирования разряда секции 80 нФ на нагрузку 0.95 Ом в случае использования одного и шести каналов в разряднике. Для случая одноканального разрядника индуктивность секции  $L_B$  увеличивалась в соответствии с данными таблицы 3.12.

Хорошее совпадение результатов моделирования с экспериментом оправдывает использование модели Брагинского и приближения постоянной индуктивности разрядника для прогнозирования выходных параметров импульсов разработанных секций и генераторов на их основе.

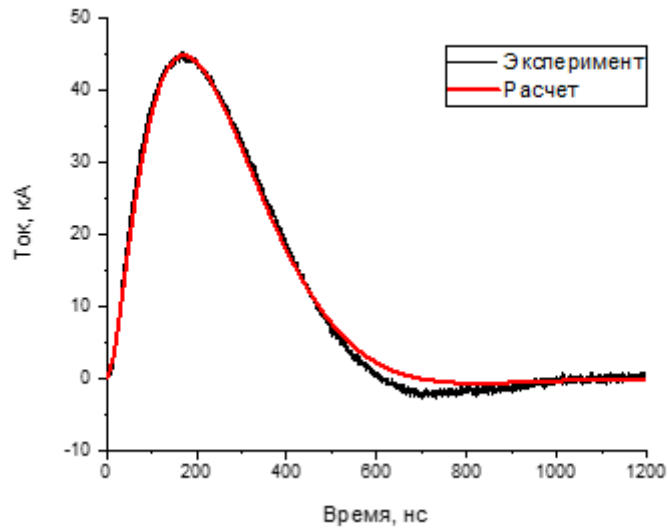


Рисунок 3.17 – Экспериментальная и расчетная кривые тока разряда секции 160 нФ на нагрузку 1 Ом при зарядном напряжении 85 кВ

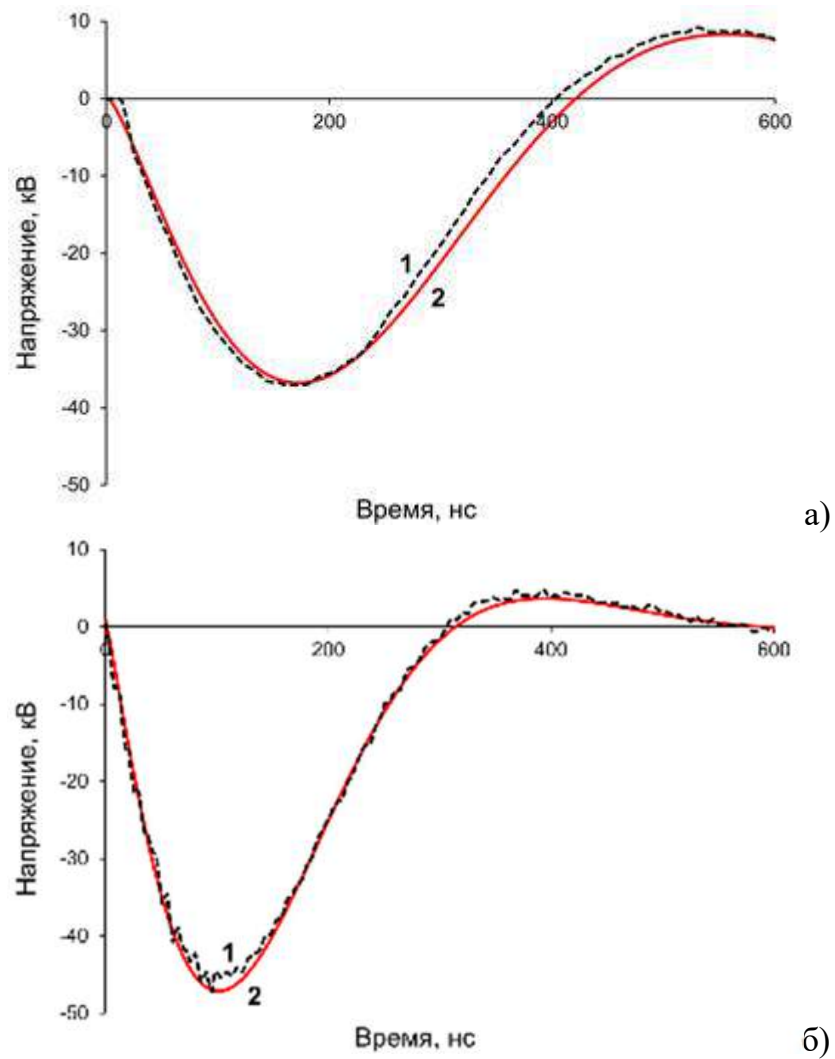


Рисунок 3.18 – Экспериментальная 1 (пунктирная) и расчетная 2 (сплошная) кривые напряжения на нагрузке 0.95 Ом для секции 80 нФ с одноканальным (а) и шестиканальным (б) разрядником

Моделирование позволяет оценить долю запасаемой энергии, затрачиваемой на коммутацию емкостного накопителя. Например, на рисунке 3.19 представлены расчетные зависимости потерь энергии в разряднике секции 80 нФ от числа каналов для двух режимов разряда на нагрузку 0.95 Ом и 1.7 Ом при зарядном напряжении 100 кВ. Для секции 80 нФ при коммутации одним искровым каналом в аperiodическом режиме разряда на нагрузку 1.7 Ом потери энергии составляют 70 Дж или 17 % от уровня запасаемой энергии. С увеличением числа каналов в разряднике до шести потери энергии снижаются до 14 %. При уменьшении сопротивления нагрузки до 0.95 Ом и реализации периодического режима разряда потери энергии в разряднике увеличиваются и составляют 26 % при коммутации одним каналом и 23 % при коммутации шестью каналами. Дальнейшее увеличение числа каналов в разряднике, с одной стороны, дает рост мощности, уменьшение фронта импульса и энергии, затраченной на коммутацию. С другой стороны, с ростом числа каналов усложняются конструкция самого разрядника и система запуска для зажигания всех каналов. В связи с этим для коммутации конденсаторов мы остановились на использовании шести искровых каналов в разряднике.

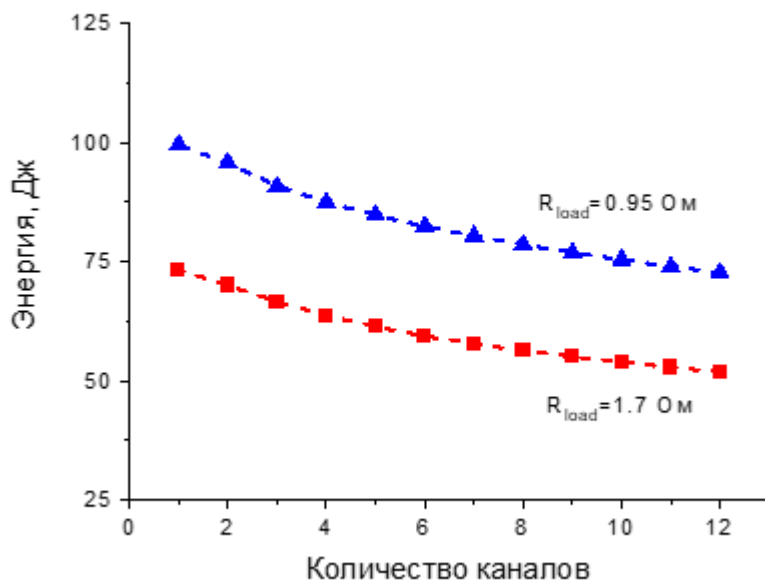


Рисунок 3.19 – Расчетные зависимости потерь энергии в разряднике от числа каналов

Важным вопросом является зависимость потерь энергии на коммутацию от емкости накопителя секции. Использование накопителя с меньшей емкостью позволяет

уменьшить время нарастания выходного импульса и сократить время вывода энергии в нагрузку. При этом с уменьшением емкости накопителя секции абсолютные потери в разряднике снижаются, но их доля относительно запасаемой энергии возрастает. Расчетные данные потерь энергии в шестиканальном разряднике для секций 160, 80 и 16 нФ в режиме разряда с выходной мощностью, близкой к предельной, обобщены на рисунке. 3.20. Также приведены расчетные данные для секции с емкостью накопителя 3.2 нФ (как в секции для формирования предымпульса из подраздела 7.5.1). В расчетах для всех секций принята одинаковая индуктивность 55 нГн. Согласно расчету, при уменьшении емкости в 5 раз с 80 нФ до 16 нФ относительные потери в разряднике выросли в 1.7 раза. Дальнейшее снижение емкости накопителя до 3.2 нФ при сохранении индуктивности контура приводит к увеличению относительных потерь еще в 2.5 раза.

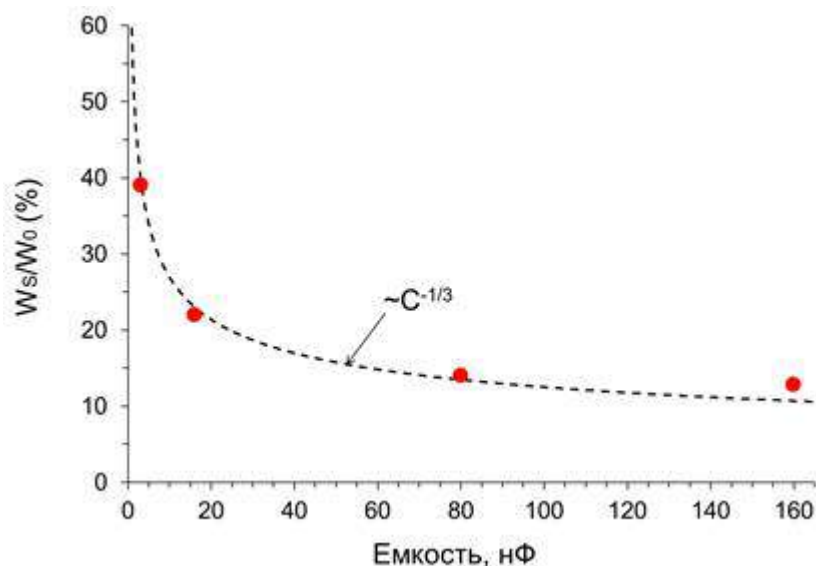


Рисунок 3.20 – Относительные потери энергии в разряднике  $W_s/W_0 \times 100\%$  в зависимости от емкости секции

Аналитическую зависимость потерь энергии в разряднике от емкости накопителя секции несложно получить, заложив в модель Брагинского линейную функцию тока от времени, как это сделано, например, в работе [139]. Для «критического» режима разряда передний и задний фронты импульса тока можно приближенно представить в виде:

$$I(t) = \begin{cases} K_1 t, & 0 < t < T_f \\ I_0 - K_2 t, & T_f \leq t \leq 4T_f \end{cases} \quad (3.20)$$

где  $I_0 = \frac{0.37U_0}{\rho} = 0.37U_0 \sqrt{\frac{C}{L}}$  – амплитуда тока разряда;

$T_f = \sqrt{LC}$  – длительность переднего фронта тока;

$K_1 = I_0/T_f, K_2 = I_0/4T_f$  – угловые коэффициенты.

Время  $4T_f$  соответствует спаду тока от амплитудного значения до уровня  $0.2 I_0$ . С учетом (3.16) зависимость энергии, рассеянной в многоканальном разряднике, от параметров контура имеет вид:

$$W_S = N \int_0^{4T_f} \left( \frac{I(t)}{N} \right)^2 R_{CH}(t) \cdot dt \propto \frac{25 \cdot d \cdot I_0^{4/3}}{9N^{1/3}}, \quad (3.21)$$

где  $N$  – число искровых каналов.

Потери энергии в многоканальном разряднике относительно запасенной энергии  $W_0 = \frac{CU_0^2}{2}$  есть:

$$\frac{W_S}{W_0} \propto \frac{1.5d}{U_0^{2/3} L^{2/3} C^{1/3} N^{1/3}}. \quad (3.22)$$

Из (3.22) следует, что если сжатие импульса происходит за счет уменьшения емкости, то при  $L = const$  относительные потери в разряднике будут расти как  $\frac{W_S}{W_0} \propto \frac{1}{C^{1/3}}$ .

Относительные потери энергии можно оставить неизменными, если увеличивать число каналов в разряднике во столько же раз, во сколько уменьшается емкость. Однако это сопряжено с усложнением конструкции разрядника и системы запуска. Таким образом, увеличение относительных потерь энергии ограничивает возможность снижения длительности импульса за счет уменьшения емкости секций. Поэтому секции с емкостью в единицы нФ целесообразней применять лишь как вспомогательные для формирования высших гармоник в ЛТД ступенях с квазипрямоугольным импульсом [96–99] или для формирования предимпульса в ступенях ЛТД генератора для источника сильноточного электронного пучка (подраздел 7.5) [140, 141].

### 3.6 Выводы

Созданы секции из параллельно включенных конденсаторов и шестиканального семизазорного искрового разрядника в едином корпусе из компаунда на основе эпоксидной смолы. Максимальное зарядное напряжение конденсаторов секций составляет 100 кВ при условии их эксплуатации в масле. Корпус из эпоксидного компаунда усиливает внешнюю изоляцию конденсаторов и делает возможной их эксплуатацию в воздухе атмосферного давления при зарядном напряжении 100 кВ. При этом рабочей средой разрядника также является воздух атмосферного давления.

При суммарной емкости конденсаторов 160 нФ пиковая мощность секции  $W$  достигает 2.6 ГВт на нагрузке около 1 Ом, амплитуда тока разряда  $I_m$  составляет около 50 кА, фронт импульса по уровню 0.1–0.9 от амплитудного значения  $t_{1-9} \approx 65$  нс; при емкости конденсаторов секции 80 нФ:  $W \approx 2.2$  ГВт на нагрузке около 1.7 Ом,  $I_m \approx 35$  кА,  $t_{1-9} \approx 45$  нс; при емкости конденсаторов секции 16 нФ:  $W \approx 1.1$  ГВт на нагрузке около 2 Ом,  $I_m \approx 20$  кА,  $t_{1-9} \approx 25$  нс.

Конденсаторы в жестком корпусе из эпоксидного компаунда способны обеспечивать до  $10^5$  включений при зарядном напряжении 90–95 кВ в режиме разряда с реверсом 10 % и амплитуде тока через конденсатор около 12 кА. Экспериментально подтверждена работоспособность разрядника без обслуживания в течение всего ресурса конденсаторов секции.

Временная постоянная секций с изоляцией воздухом атмосферного давления не превышает временной постоянной секций, с идентичным энергозапасом, для ЛТД ступеней с масляной изоляцией.

## 4 ЛТД ступень с изоляцией воздухом атмосферного давления, мегаамперным уровнем тока и временем нарастания импульса 100 нс

### 4.1 Конструкция ЛТД ступени

ЛТД ступень описана в работах [114, 142, 143]. Использование воздуха атмосферного давления в качестве изоляции позволило выполнить ступень без сплошного герметичного корпуса и реализовать важные преимущества:

- простоту конструкции, что положительно сказывается на надежности и стоимости как самой ступени, так и установки на ее основе;
- возможность обслуживания элементов ступени без полной разборки, что особенно важно при ее работе в составе модуля.

Конструкция и внешний вид ЛТД ступени показаны на рисунках 4.1 и 4.2. Ступень содержит емкостной накопитель энергии из двадцати секций 80 нФ (1), включенных параллельно. Секции разбиты на четыре идентичных сегмента (2) по пять секций в каждом. При зарядном напряжении 100 кВ запасаемая энергия в емкостном накопителе ЛТД ступени составляет 8 кДж.

Четыре сегмента расположены по сторонам опорной плиты (3) и прикреплены к ней низковольтной стороной с помощью болтовых соединений. Между секциями сегментов и плитой расположен изолятор из оргстекла (4) толщиной 15 мм. Внутренняя торцевая поверхность изолятор имеет угол наклона 45°. Высоковольтные выводы секций, выполненные в виде пластин из фосфористой бронзы, прижимаются к сборным электродам ступени (7). Отсоединив болтовое соединение между сегментами и основанием ступени, можно извлечь любой из сегментов для ревизии без полной разборки ступени.

В центральной части ЛТД ступени расположены кольца ферромагнитного сердечника (5). Кольца монтируются на опорном стальном кольце (6), к которому крепятся сборные электроды ступени (7). Стальное кольцо является внешним электродом выходной коаксиальной линии ступени.

Кольца сердечника намотаны лентой из электротехнической стали ЭТ-3425 толщиной  $\delta=0.05$  мм и шириной  $h=18$  мм. Витки изолированы пленкой из лавсана



толщиной 0.01 мм. Лента намотана на цилиндрическую оправку из стальной полосы толщиной 4 мм и шириной 25 мм. Торцевые поверхности колец залиты компаундом на основе эпоксидной смолы. Внешний диаметр сердечника  $OD$  составляет 1.69 м, внутренний  $ID$  – 1.54 м. Длина средней магнитной линии  $l_f=0.5 \cdot \pi \cdot (OD+ID) \approx 5.1$  м. Площадь, занимаемая электротехнической сталью в поперечном сечении сердечника из трех колец, с учетом коэффициента заполнения  $k \approx 0.8$ :  $S_f=k \times h \times 0.5(OD-ID) = 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

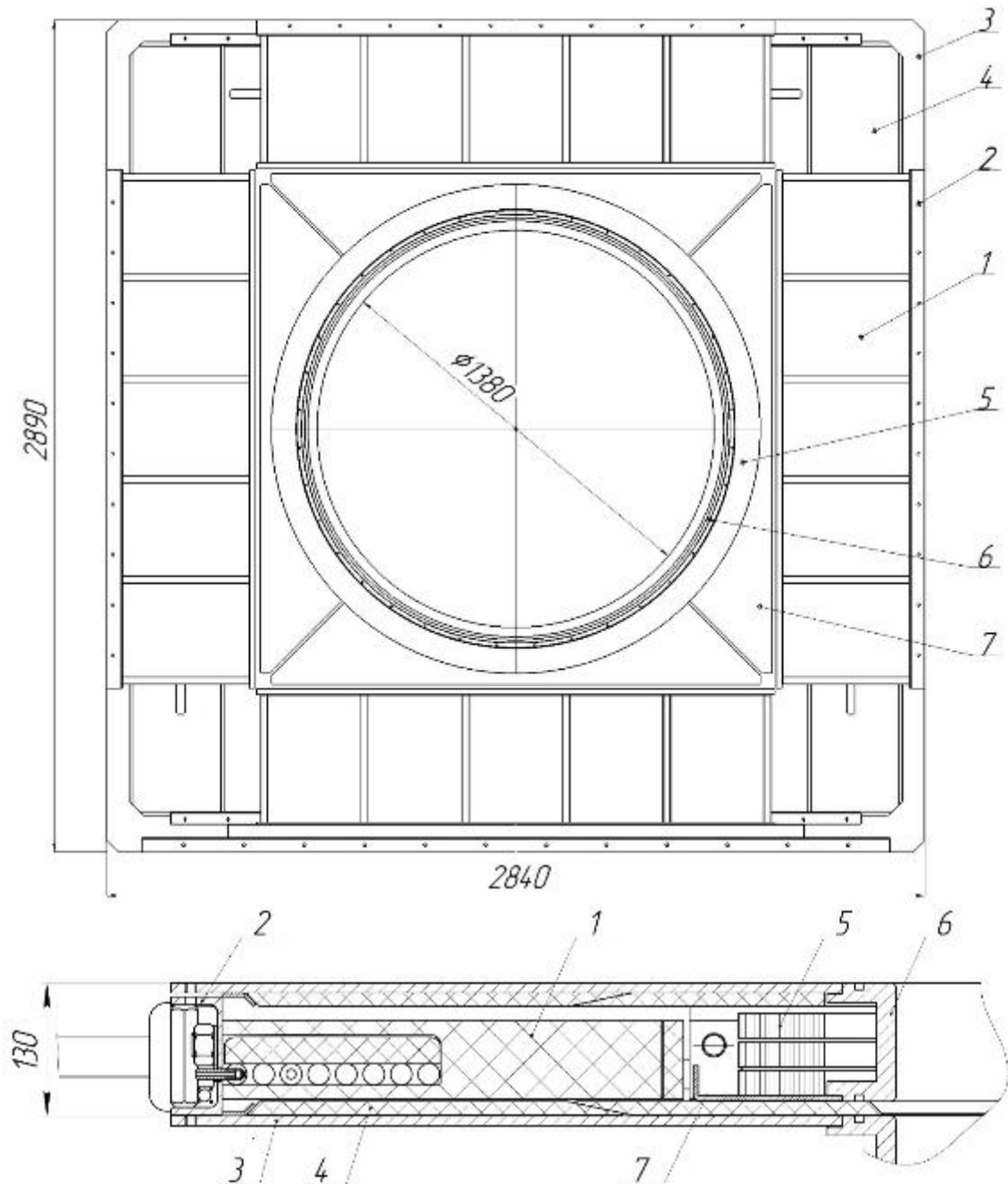


Рисунок 4.1 – Конструкция ЛТД ступени: вид сверху и боковое сечение. 1 – секция; 2 – сегмент из пяти секций; 3 – опорная плита; 4 – изолятор из оргстекла; 5 – кольца сердечника; 6 – опорное кольцо; 7 – сборный электрод

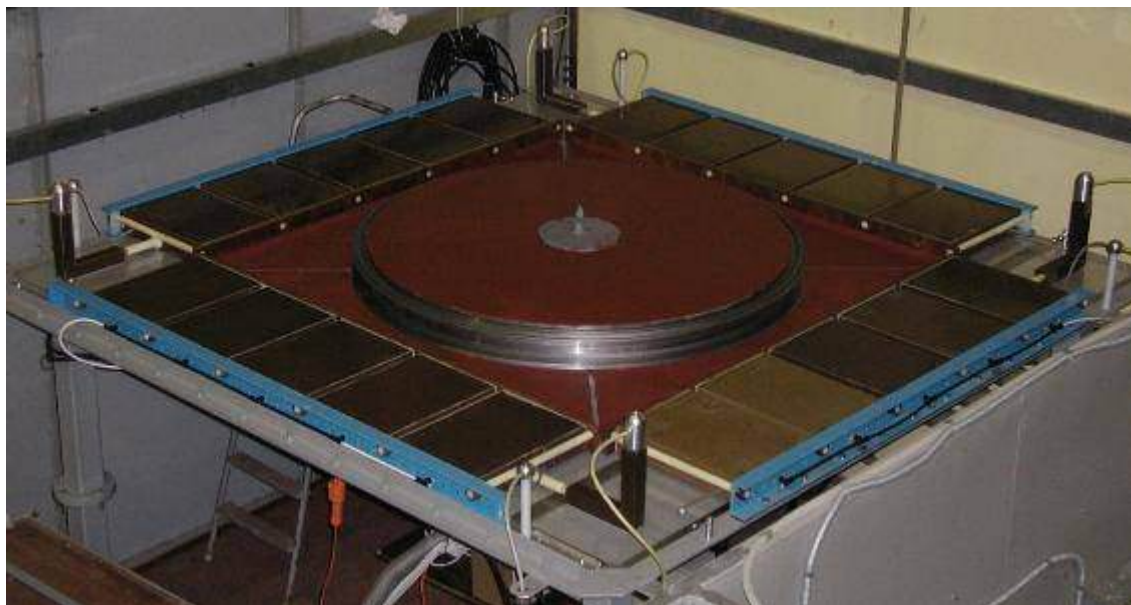


Рисунок 4.2 – Фотография ЛТД ступени со снятым сердечником

Габаритные размеры ступени 2.9 м × 2.9 м × 0.13 м. Вес ступени около 1200 кг.

Конструкция и фотография сегмента даны на рисунке 4.3. Секции (1) размещены на металлическом основании (2) из швеллера № 12 и прижаты к нему плитой из дельта-древесины (4) с помощью шести шпилек из капролона (3). Между плитой и секциями расположены 10 пластин из фосфористой бронзы, соединенные с электродами конденсаторов секций. С помощью этих пластин осуществляется электрическое соединение сегмента со сборным электродом ступени. Крайняя в сегменте секция имеет проходной изолятор (5), через который зарядное напряжение подводится к конденсаторам секции. Между секциями также установлены проходные изоляторы для передачи зарядного напряжения. Высоковольтный пусковой проводник (6) в полиэтиленовой изоляции пропущен последовательно через пусковые электроды разрядников всех пяти секций. Пусковое напряжение может быть подано как с одной стороны сегмента, так и с обеих сторон для уменьшения разности во времени прихода запускающего импульса между отдельными секциями.

Габаритные размеры сегмента 2000 мм × 515 мм × 120 мм. Вес сегмента около 100 кг.

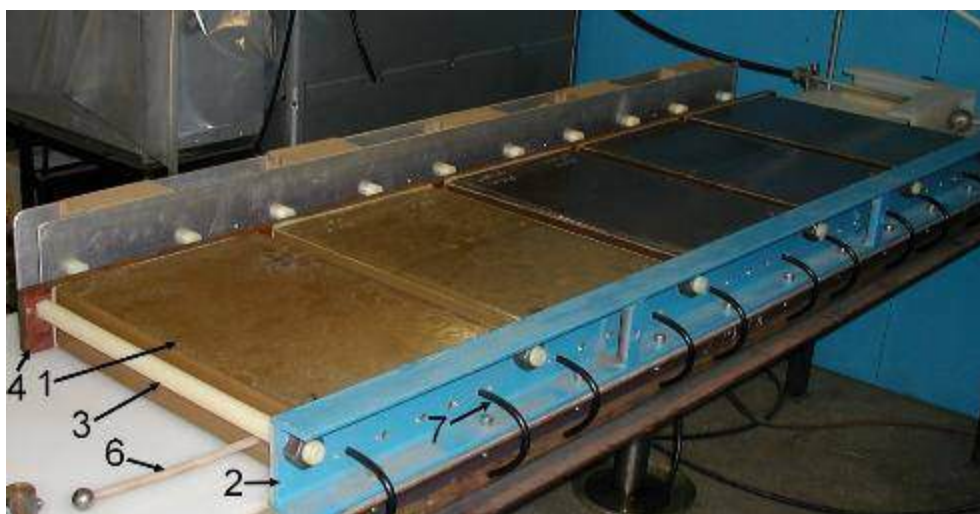
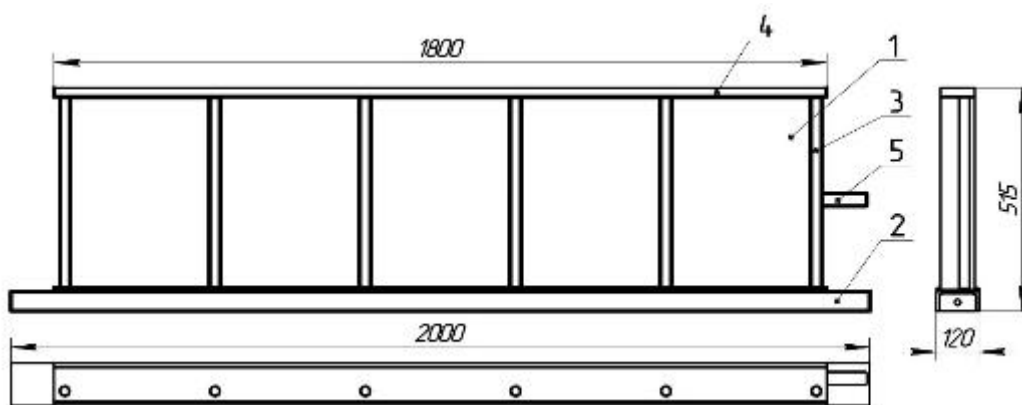


Рисунок 4.3 – Конструкция сегмента из пяти секций и фотография сегмента, установленного в испытательном стенде: 1 – секция; 2 – основание из швеллера № 12; 3 – диэлектрические шпильки; 4 – диэлектрическая плита; 5 – высоковольтный ввод зарядного напряжения, 6 – пусковой проводник, 7 – вводы для продувки разрядников секций

#### 4.2 Параметры разряда сегмента ЛТД ступени

Параметры разряда единичного сегмента ступени получены на нагрузке с сопротивлением 0.2 Ом и индуктивностью 6.4 нГн. Нагрузка выполнена из пяти фольговых резисторов из нержавеющей стали. Фольга шириной 120 мм сложена «гармошкой» из 50 слоев, изолированных между собой электротехническим картоном. Расстояние между соседними слоями 0.5 мм, длина слоя 120 мм. Сопротивление каждого из пяти резисторов  $R=1$  Ом, индуктивность  $L=32$  нГн.

Осциллограммы и расчетные кривые, иллюстрирующие разряд сегмента, приведены на рисунке 4.4. При зарядном напряжении 100 кВ в секциях сегмента запасается энергия 2 кДж. В нагрузку 0.2 Ом выводится энергия около 1.7 кДж с пиковой мощностью более 10 ГВт. Время вывода энергии между уровнями (0.1–0.9) от

амплитудного значения составляет около 155 нс. Амплитуда тока разряда на резистивную нагрузку достигает 230 кА, время нарастания импульса по уровню 0.1–0.9 от амплитудного значения – 80 нс.

В испытаниях сегмента была проверена возможность синхронного параллельного включения пяти секций. Синхронность включения подтверждается пятикратным увеличением мощности импульса в нагрузке по сравнению с результатами испытаний одной секции 80 нФ на нагрузку 1.16 Ом, 40 нГн (см. подраздел 3.3.3.2). Время нарастания тока не изменилось по сравнению с результатами испытаний одной секции.

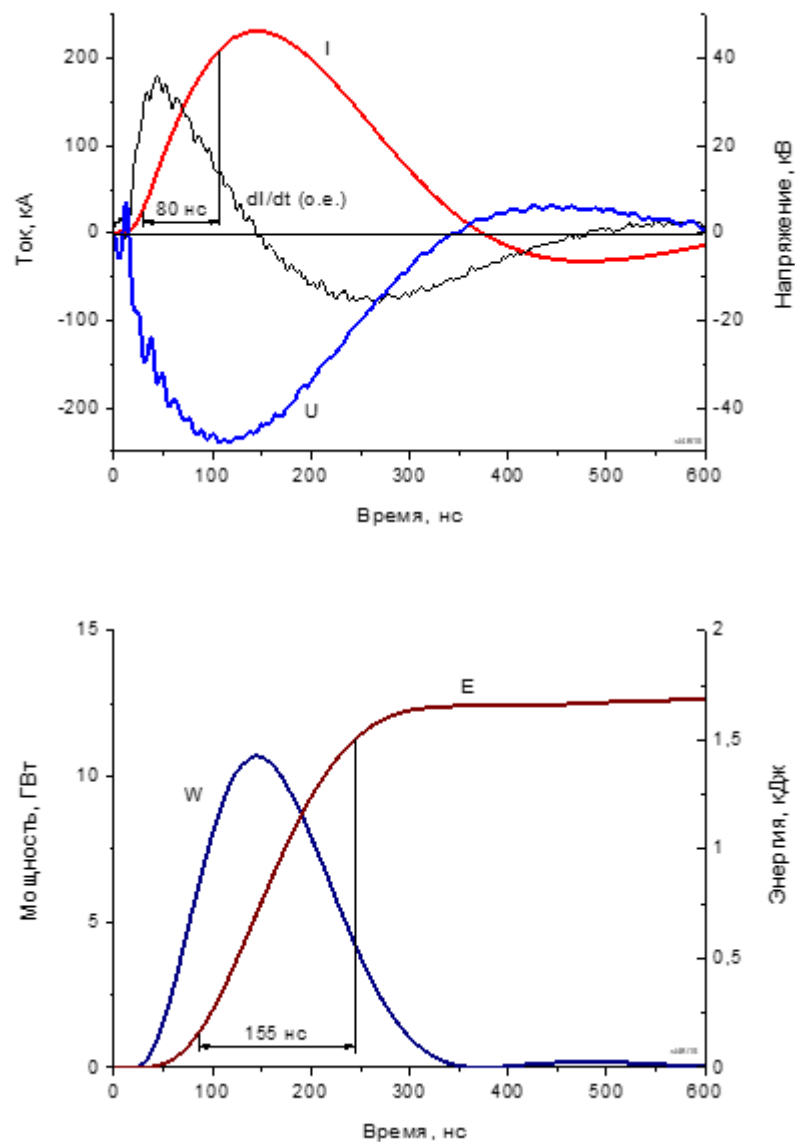


Рисунок 4.4 – Осциллограммы и расчетные кривые разряда сегмента из пяти секций 80 нФ на нагрузку 0.2 Ом, 6.4 нГн:  $I$  – ток нагрузки,  $dI/dt$  – производная тока нагрузки в относительных единицах,  $U$  – напряжение на нагрузке,  $W$  – выходная мощность,  $E$  – энергия, выделившаяся в нагрузке

Наработка сегмента при зарядном напряжении 100 кВ и частоте следования импульсов 0.1 Гц составила  $6 \cdot 10^3$  включений на указанную выше нагрузку. Никакого обслуживания при этом не производилось. В таком же режиме выполнена наработка по  $1 \cdot 10^3$  включений еще для трех сегментов, подготовленных для ЛТД ступени.

### 4.3 Параметры ЛТД ступени

В испытаниях ЛТД ступень располагалась в горизонтальном положении на опорном столе (рисунок 4.5). В центре ступени под основанием смонтирован турбомолекулярный насос ТМН-500, позволяющий откачивать центральный объем ступени до остаточного давления  $\sim 10^{-5}$  Торр. Предусмотрена также возможность заполнения центрального объема элегазом.



Рисунок 4.5 – Стенд для испытания ступени

Принципиальная схема ступени и расположение регистрационных датчиков, использованных при испытании и исследовании характеристик ЛТД ступени, даны на рисунке 4.6. Система регистрации включала резистивные делители напряжения, индуктивные и резистивные токовые шунты. Для регистрации сигналов использовались цифровые осциллографы Tektronix с полосой пропускания 500 МГц.

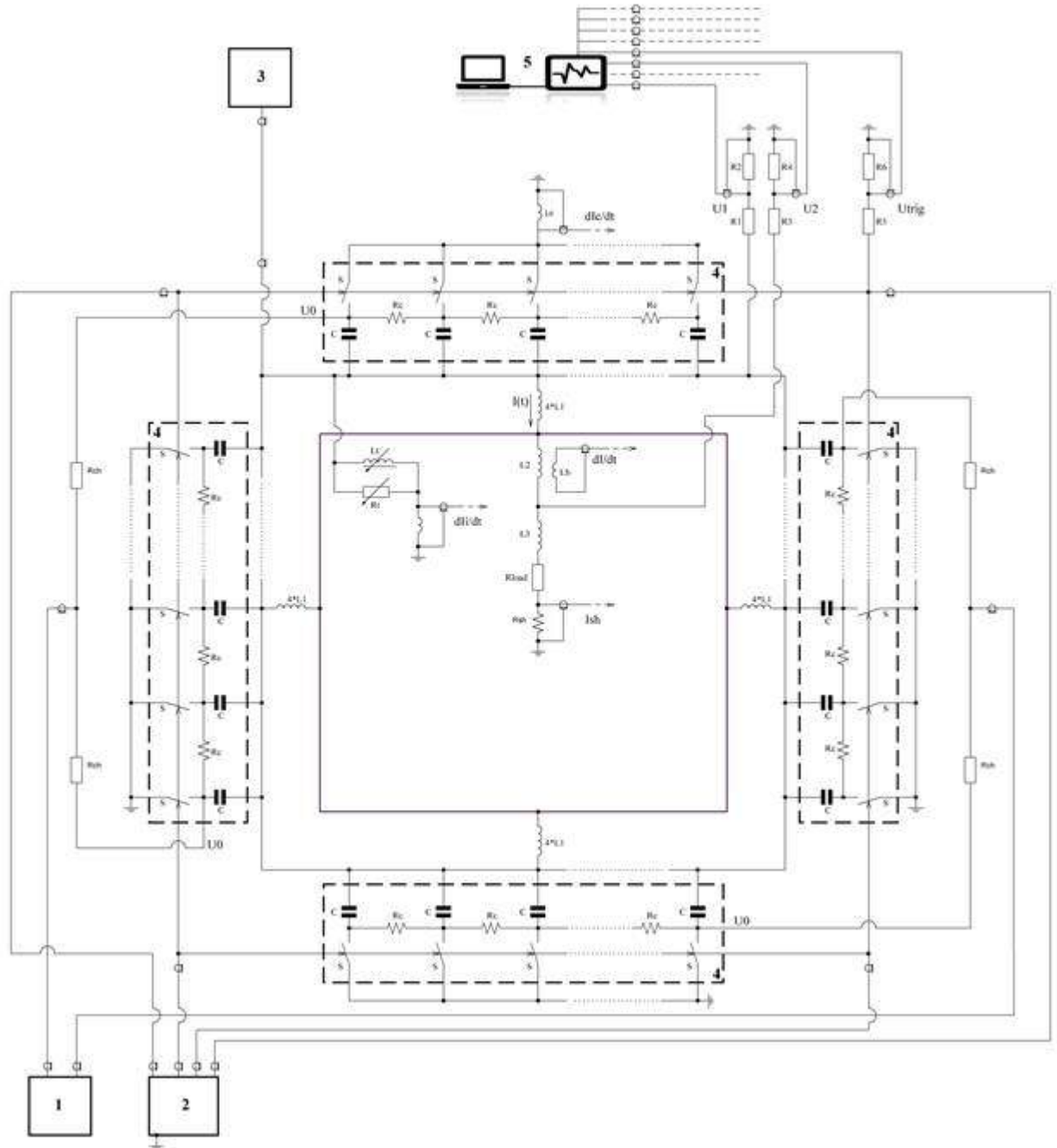


Рисунок 4.6 – Схема исследования ЛТД ступени: 1– высоковольтный источник питания; 2 – генератор запускающих импульсов; 3 – генератор подмагничивания; 4– сегмент; 5 – осциллограф;  $R_{ch}$  и  $R_c$  – зарядные резисторы;  $L_1$  – индуктивность сборного электрода;  $L_2$ ,  $L_3$  и  $R_{load}$  – индуктивность и сопротивление нагрузки;  $L_t$ ,  $R_t$  – индуктивность и сопротивление, замещающие индуктор ступени с ферромагнитным сердечником. Система регистрации: резистивный делитель  $R_1$ – $R_2$  для измерения напряжения на выходе сегментов  $U_1$ ; резистивный делитель  $R_3$ – $R_4$  для измерения напряжения на нагрузке  $U_2$ ; резистивный делитель  $R_5$ – $R_6$  для измерения пускового импульса напряжения  $U_{trig}$ ; индуктивный шунт  $L_c$  для измерения производной тока  $dI_c/dt$  в одном из сегментов ступени и последующего восстановления из регистрируемого сигнала тока сегмента и расчета тока четырех сегментов  $I_c$  (ток емкостного накопителя ступени); индуктивный датчик  $L_b$  для измерения производной тока  $dI/dt$  в нагрузке ступени; резистивный шунт  $R_{sh}$  для измерения тока в нагрузке ступени  $I_{load}$ ; индуктивный шунт для измерения производной тока  $dI_i/dt$  в индукторе ступени и последующего восстановления тока индуктора  $I_i$  из регистрируемого сигнала

Нагрузка ступени выполнялась из резисторов ТВО-10, 27 Ом. Первый вариант нагрузки с сопротивлением 0.1 Ом был выполнен из 300 шт. параллельно включенных резисторов. Резисторы объединены в 20 сборок по 15 резисторов. Сборки резисторов устанавливались равномерно по окружности внутри центрального объема ступени (рисунок 4.7). Сечение резисторов занимает площадь между диаметром  $2p=1344$  мм и диаметром  $2n=1316$  мм. С учетом диаметра обратного токопровода  $2q=1380$  мм и высоты нагрузки  $l=115$  мм можно оценить индуктивности нагрузки [131]:

$$L_{load}=(L_2+L_3)\approx \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \ln \frac{q}{p} + \frac{r^4}{(r^2-q^2)^2} \ln \frac{r}{q} + \frac{n^4}{(p^2-n^2)^2} \ln \frac{p}{n} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left( \frac{r^2}{r^2-q^2} + \frac{n^2}{p^2-n^2} \right) \right\} \sim 1 \text{ нГн.} \quad (4.1)$$

Индуктивности  $L_2$  и  $L_3$  показаны на схеме рисунка 4.6. Центральный объем ступени с нагрузкой заполнялся элегазом с целью исключить утечки тока с элементов нагрузки и вдоль поверхности изолятора.

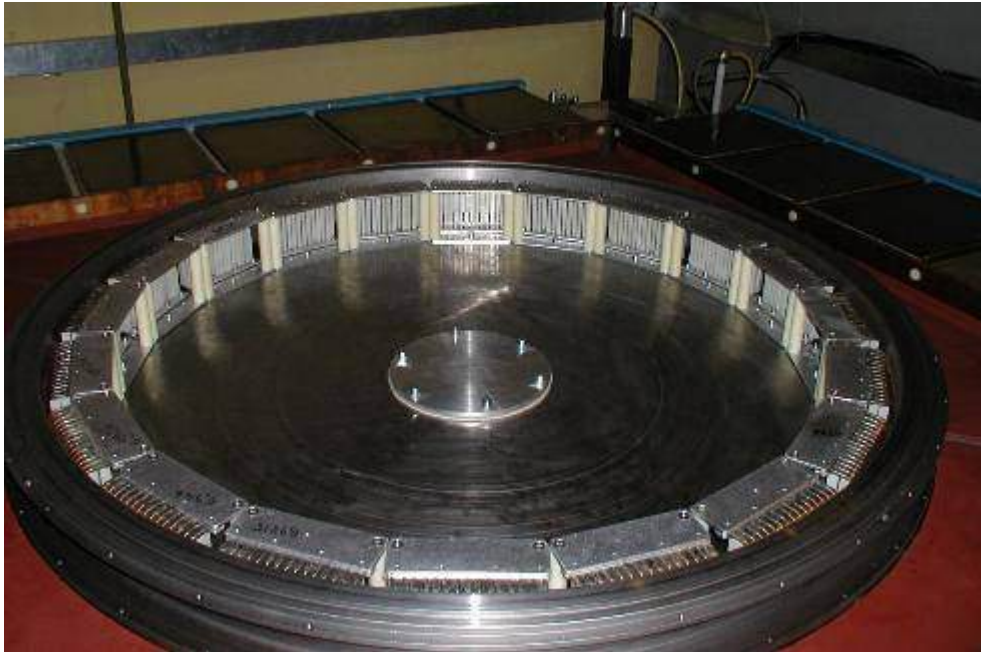


Рисунок 4.7 – Вид ступени со снятым верхним фланцем и установленными резисторами нагрузки

Второй вариант нагрузки выполнен аналогично, но количество резисторов ТВО-10, 27 Ом увеличено в 2 раза с 300 до 600 шт., что позволило снизить эквивалентное сопротивление нагрузки в 2 раза до 0.05 Ом. Резисторы нагрузки также объединены в 20 сборок, но каждая сборка состояла из 30 параллельно включенных резисторов, расположенных в два ряда.

В исследованиях ступени использовалась активная схема подмагничивания сердечника, когда ступень запускается в момент времени достижения током

подмагничивания амплитудного значения. Импульс тока подмагничивания подавался на сборный электрод ступени (позиция 7 на рисунке 4.1) по высоковольтному кабелю КВИ-120 от генератора подмагничивания на основе конденсаторной батареи емкостью 60 мкФ с зарядным напряжением 3 кВ. Амплитуда тока подмагничивания  $I_p$  составляла 2 кА, время нарастания импульса  $\sim 100$  мкс. Создаваемая напряженность магнитного поля подмагничивания  $I_p/\ell_t=0.4$  кА/м соответствует индукции  $B_p \approx 1.65$  Тл на кривой намагничивания стали ЭТ3425 (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Точки основной кривой намагничивания стали ЭТ3425: зависимости индукции магнитного поля  $B$  и остаточной индукции  $B_R$  от напряженности магнитного поля  $H$

$H$ , кА/м	0.04	0.08	0.2	0.4	1.0	2.5	10	30
$B$ , Т	1.1	1.3	1.5	1.65	1.75	1.82	$\sim 1.9$	$\sim 2$
$B_R$ , Т			1.1	1.2	1.3	1.35	$\sim 1.37$	

Положим, что индукция насыщения электротехнической стали  $B_s$  около 1.8 Тл. Тогда перепад индукции при перемагничивании сердечника основным импульсом ступени составит  $\Delta B = B_s + B_p \approx 3.45$  Тл. Для сердечника ступени оценочное значение вольт-секундного интеграла сердечника, соответствующее полному перемагничиванию,  $VS = \Delta B \times S_t \approx 11$  мВ·с. Помимо расчетного значения, вольт-секундный интеграл сердечника определялся и экспериментально при работе ступени на резистивную нагрузку с сопротивлением 0.1 Ом в режиме, когда реализуется насыщение сердечника выходным импульсом ступени.

При работе ЛТД ступени в составе модуля короткозамкнутый контур индуктора образуется опорной плитой соседней ступени. В экспериментах с единичной ЛТД ступенью контур индуктора замыкался с помощью 8 металлических труб диаметром 75 мм, как показано на рисунке 4.8.

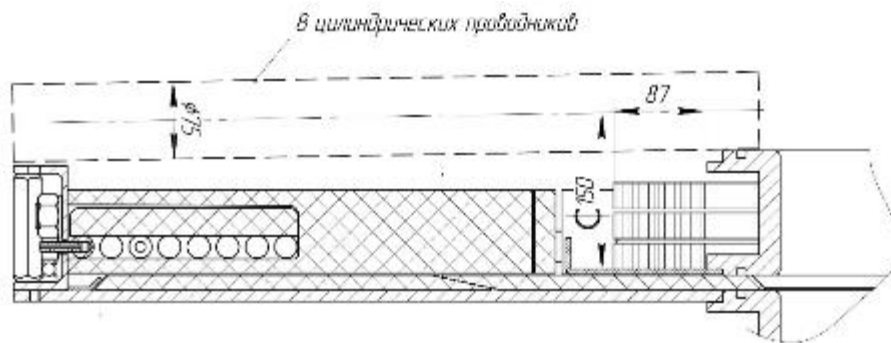


Рисунок 4.8 – Схема замыкания индуктора ЛТД ступени восемью цилиндрическими проводниками



Разряд ступени на нагрузку 0.1 Ом демонстрируется рисунком 4.9. Кривые с индексом 1 соответствуют случаю разомкнутого контура индуктора. Кривые с индексом 2 соответствуют случаю замкнутого контура индуктора. В случае отсутствия утечек через цепь индуктора амплитуда тока в нагрузке составляет около 620 кА при зарядном напряжении 100 кВ. В нагрузку 0.1 Ом передается энергия 7.3 кДж с пиковой мощностью 38 ГВт. При замкнутом контуре индуктора в нем протекает ток с амплитудой 65 кА, амплитуда тока в нагрузке снижается до 605 кА. Время нарастания импульса тока по уровню 0.1–0.9 от амплитудного значения составляет 70 нс. Подключение контура индуктора приводит к снижению пиковой мощности в нагрузке на 5 % до 36 ГВт. При этом выведенная в нагрузку энергия снижается с 7.3 до 6.6 кДж. Время вывода энергии между уровнями 0.1–0.9 от амплитудного значения составляет около 195 нс.

Из осциллограмм тока в цепи индуктора  $I_i$  и его производной  $dI_i/dt$  следует, что в момент времени  $\sim 250$  нс после начала импульса происходит насыщение сердечника. Вольт-секундный интеграл к этому моменту времени достигает 11 мВ·с, что согласуется с расчетным значением.

При снижении сопротивления нагрузки в 2 раза до 0.05 Ом амплитуда тока в нагрузке возрастает до 850 кА (рисунок 4.10). Время нарастания импульса тока по уровню 0.1–0.9 от амплитудного значения составляет 90 нс. Время вывода энергии в нагрузку между уровнями (0.1–0.9) уменьшилось со 195 нс до 165 нс при незначительном снижении пиковой мощности до 35 ГВт. Вольт-секундный интеграл сердечника в этом режиме разряда не превышает 10 мВ·с. Насыщение сердечника в течение импульса не происходит.

Результаты исследований ступени с резистивными нагрузками обобщены в таблице 4.2. Используются следующие обозначения:  $U_0$  – зарядное напряжение ступени;  $I$  – амплитуда тока нагрузки;  $t_f$  – время до максимума тока;  $U$  – амплитуда напряжения на нагрузке;  $W$  – мощность на нагрузке;  $E$  – энергия, переданная в нагрузку;  $\eta = E/E_0 \times 100$  – эффективность передачи запасенной энергии  $E_0$  в нагрузку.

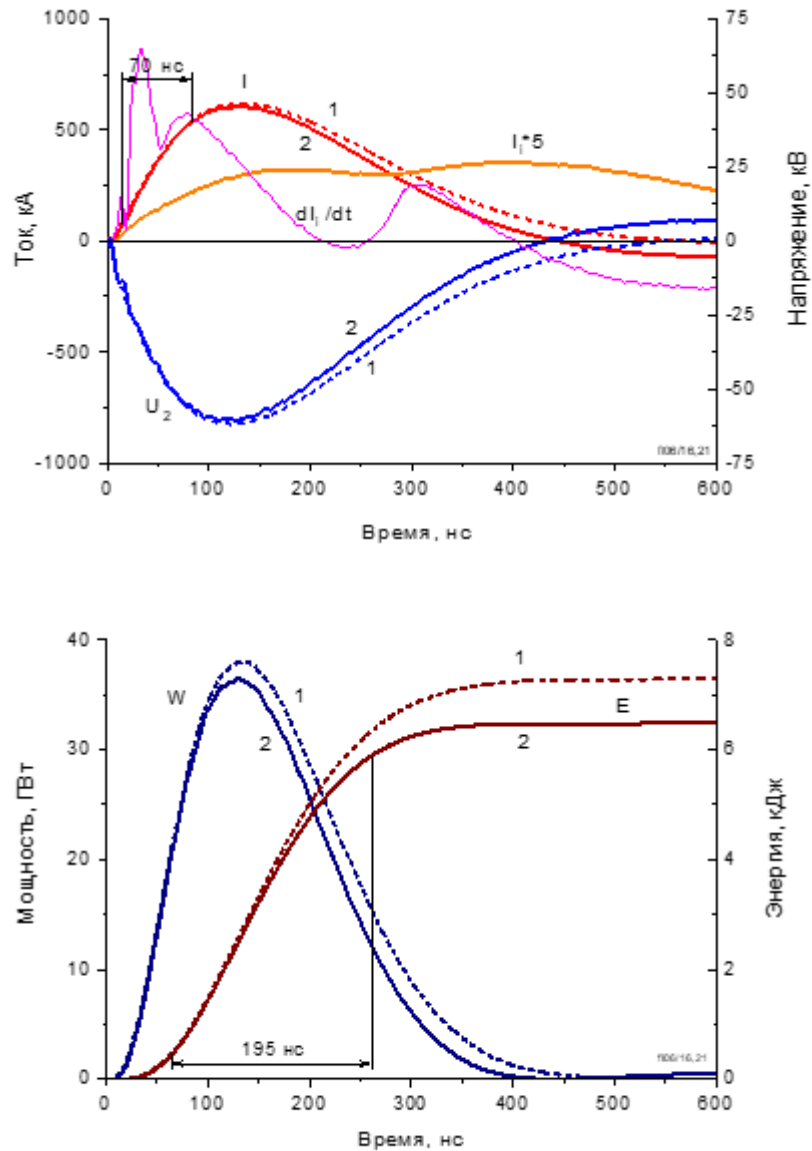


Рисунок 4.9 – Осциллограммы и расчетные кривые разряда ЛТД ступени на нагрузку 0.1 Ом при разомкнутом (1) и замкнутом (2) контуре индуктора:  $I$  – ток нагрузки;  $I_i$  – ток в цепи индуктора (увеличен для наглядности в 5 раз);  $dI_i/dt$  – производная тока в индукторе в относительных единицах;  $U_2$  – напряжение на нагрузке;  $W$  – мощность в нагрузке;  $E$  – энергия, выделившаяся в нагрузке. Зарядное напряжение ступени 100 кВ

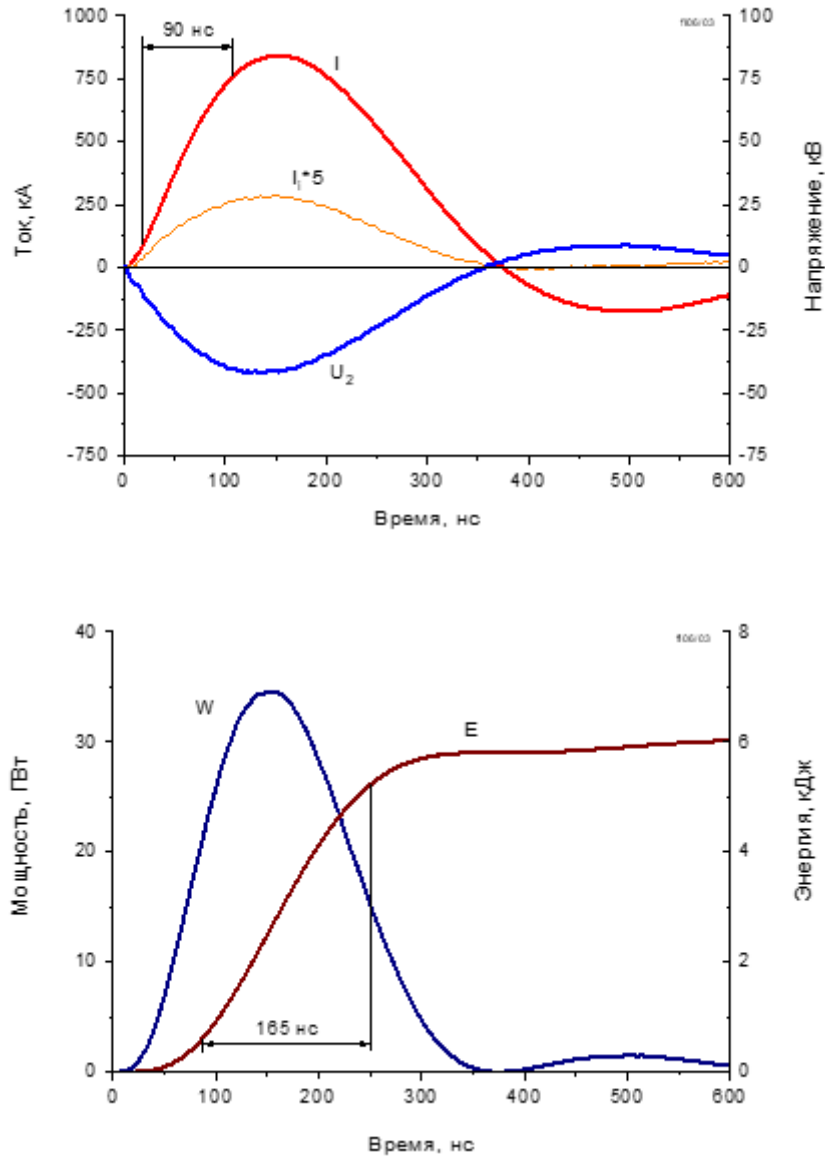


Рисунок 4.10 – Осциллограммы и расчетные кривые разряда ЛТД ступени на нагрузку 0.05 Ом, 1 нГн при замкнутом контуре индуктора:  $I$  – ток нагрузки;  $I_i$  – ток в цепи индуктора (увеличен для наглядности в 5 раз);  $U$  – напряжение на нагрузке;  $W$  – мощность в нагрузке;  $E$  – энергия, выделившаяся в нагрузке

Таблица 4.2 – Параметры импульса ЛТД ступени при разряде на нагрузку 0.1 и 0.05 Ом

$U_0$ , кВ	$I$ , кА	$t_f$ , нс	$U$ , кВ	$W$ , ГВт	$E$ , кДж	$\eta$ , %	$U \cdot dt$ , мВ·с
Нагрузка 0.1 Ом. Цепь индуктора замкнута.							
90	538	130	53.5	29	5.3	82	13.1
95	573	130	57.0	33	5.9	82	13.7
100	607	130	60.5	36	6.6	82	14.3
Нагрузка 0.05 Ом. Цепь индуктора замкнута.							
90	756	150	37.0	28	4.9	76	8.1
95	804	145	40	32	5.5	76	8.6
100	849	145	42.0	35	6.1	76	9.0

Полученные результаты подтверждают параллельную работу четырех сегментов в ступени. Увеличение мощности в нагрузке менее чем в 4 раза и затягивание фронта импульса тока на  $\sim 10$  нс в сравнении с экспериментом с одним сегментом связаны с появлением дополнительной индуктивности сборного электрода ступени (позиция 7 на рисунке 4.1).

Для оценки индуктивности  $L_1$  сборного электрода воспользуемся экспериментальными данными разряда ступени с разомкнутым контуром индуктора на рисунке 4.11.

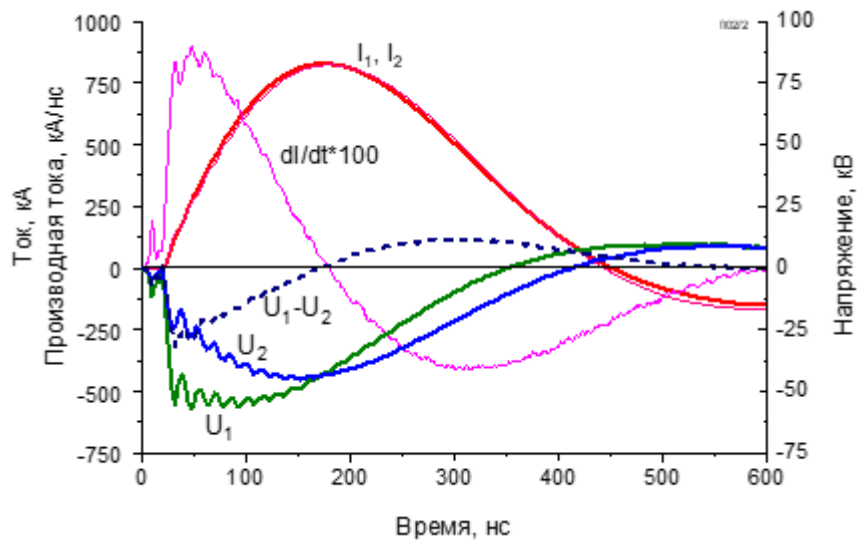


Рисунок 4.11 – Осциллограммы и расчетные кривые разряда ЛТД ступени на нагрузку 0.05 Ом при разомкнутом контуре индуктора

На рисунке 4.11 помимо осциллограмм измеряемых сигналов напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  и тока ступени  $I_1$  приведена кривая тока  $I_2$ , рассчитанная из напряжения  $U_1$  в соответствии с электрической схемой рисунка 4.6:

$$I_2(t) = \frac{1}{L_1 + L_2 + L_3} \exp\left(-t \frac{R_{load}}{L_1 + L_2 + L_3}\right) \int_0^t U_1(t) \exp\left(t \frac{R_{load}}{L_1 + L_2 + L_3}\right) dt. \quad (4.2)$$

В выражении (4.2) значение индуктивности  $(L_1 + L_2 + L_3) = 2.5$  нГн было подобрано таким образом, чтобы амплитуда тока  $I_2$  совпадала с амплитудным значением тока  $I_1$  и время достижения амплитудного значения совпадало с временем перехода регистрируемого сигнала  $dl_1/dt$  через ноль. С учетом того, что  $L_{load} = (L_2 + L_3) \approx 1$  нГн, имеем оценку  $L_1 \approx 1.5$  нГн. Таким образом, дополнительная индуктивность, вносимая сборным

электродом, приходящаяся на одну секцию в составе ступени, без учета индуктивности нагрузки, составляет  $20 \times L_1 \approx 30$  нГн.

#### 4.4 Испытание проходного вакуумного изолятора

Поскольку в выше представленных испытаниях область нагрузки заполнялась элегазом, нельзя сделать заключение об электрической прочности проходного изолятора ступени в вакууме. Попытка работать с резистивной нагрузкой в вакууме при уровне напряжения на нагрузке около 50 кВ привела к пробоем вдоль поверхности резисторов нагрузки. Поэтому для испытания электрической прочности вакуумной поверхности изолятора использовалась схема, показанная на рисунке 4.12. В вакуумном объеме (2) на диаметре 250 мм устанавливалась закоротка из шести металлических проводников (3) диаметром 40 мм. Сборный электрод сегментов ступени (4) электрически оторван от опорной плиты (6). Резисторы ТВО-10 (7) вынесены наружу и установлены в разрыв между электродами (4) и (6). Эквивалентное сопротивление резисторов (7) – 0.1 Ом. Индуктивность вакуумной области контура составила около 46 нГн.

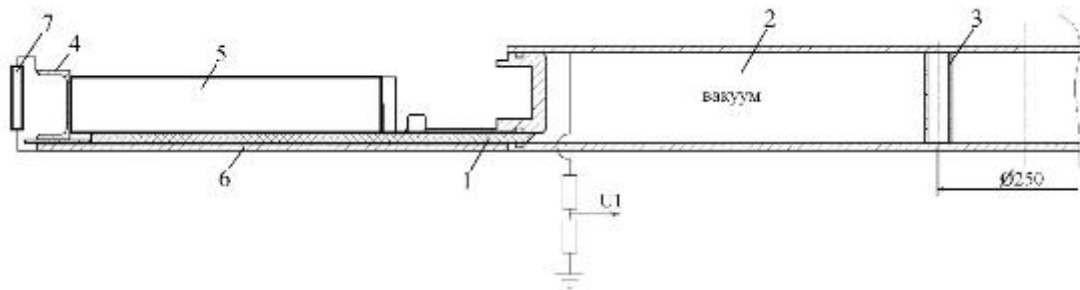


Рисунок 4.12 – Схема эксперимента по испытанию вакуумного изолятора: 1 – вакуумный проходной изолятор; 2 – вакуумный объем ступени; 3 – металлические стержни; 4 – сборный электрод сегментов ступени; 5 – секции; 6 – опорный электрод ступени; 7 – резисторы ТВО-10

Вакуумный объем откачивался турбомолекулярным насосом до остаточного давления  $5 \cdot 10^{-5}$  Торр. Напряжение на проходном изоляторе  $U_1$  регистрировалось резистивным делителем напряжения.

Осциллограмма напряжения на изоляторе при зарядном напряжении ступени 85 кВ приведена на рисунке 4.13 (кривая 1). Для сравнения также приведено напряжение на изоляторе при зарядном напряжении ступени 100 кВ в режиме разряда на нагрузку 0.1 Ом в элегазе (кривая 2). Видно, что при выбранных условиях эксперимента реализуется

напряжение в первой полуволне, по амплитуде и форме близкое к напряжению в рабочем режиме разряда. Вакуумный изолятор выдерживает напряжение первой полуволны с амплитудой более 60 кВ и пробивается на полуволне с обратной полярностью при напряжении около 30 кВ. Результаты эксперимента подтверждают работоспособность проходного изолятора в вакууме при максимальном зарядном напряжении 100 кВ в режиме разряда ступени на нагрузку  $\leq 0.1$  Ом.

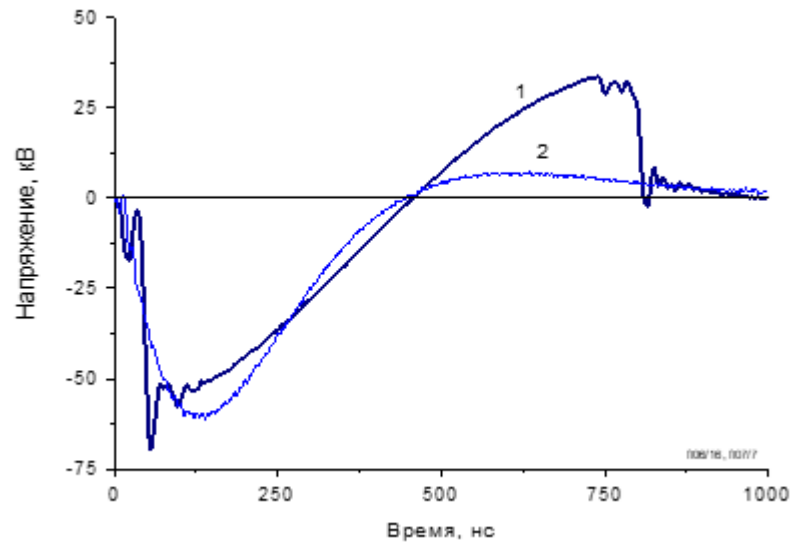


Рисунок 4.13 – Осциллограммы напряжения на изоляторе ЛТД-ступени

#### 4.5 Последовательное включение двух ступеней

Реализовано последовательное включение двух ступеней, каждая из которых содержит 20 секций 80 нФ [144]. Конструкция и фотография модуля в составе двух ступеней приведены на рисунке 4.14. В качестве нагрузки использовались жидкостные резисторы. Резисторы выполнены из стеклоэпоксидной трубы с внутренним диаметром 38 мм и высотой 122 мм с заполнением водным раствором KBr. Резисторы размещены внутри цилиндрического проводника ступени на диаметре 1264 мм. Для предотвращения пробоя по поверхности резисторов объем с нагрузкой заполнялся элегазом при давлении 1 атм. Сопротивление нагрузки варьировалось в диапазоне от 0.07 Ом до 0.14 Ом за счет изменения числа параллельно включенных резисторов от 60 до 30 шт.

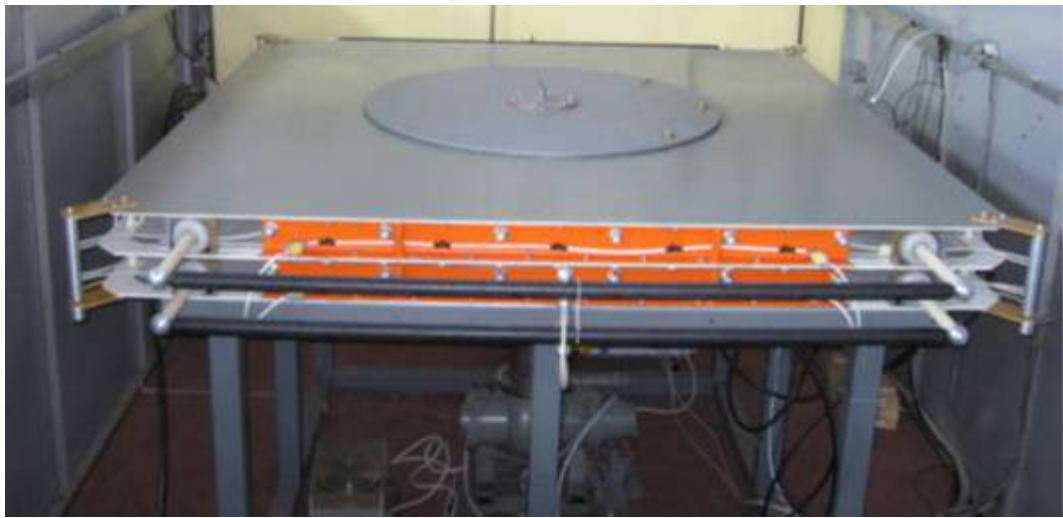
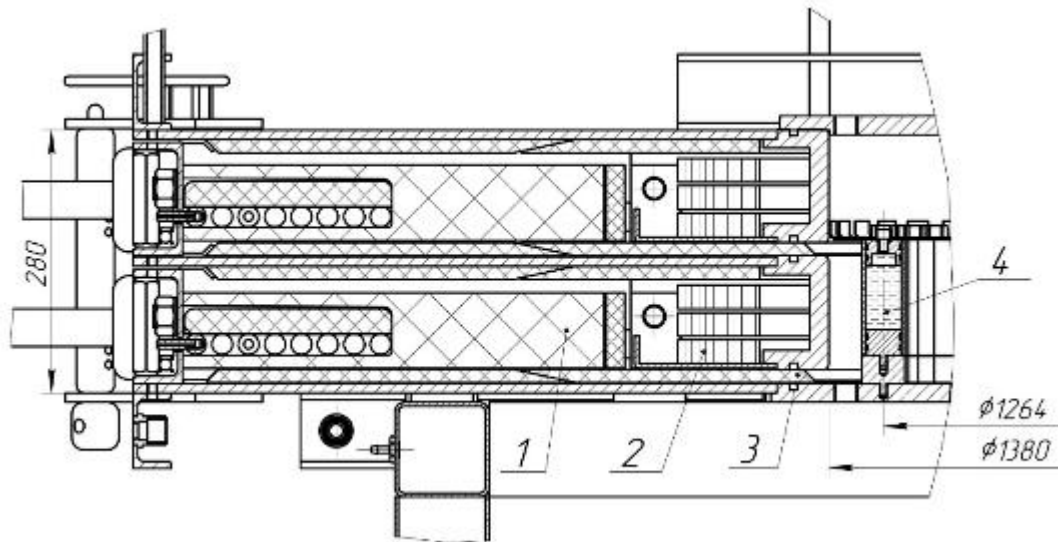


Рисунок 4.14 – Модуль в составе двух ЛТД ступеней: 1 – секции ступени; 2 – сердечник; 3 – проходной изолятор; 4 – резисторы нагрузки

Параметры разряда для трех нагрузок обобщены в таблице 4.3. Используются следующие обозначения:  $I$  – амплитуда тока нагрузки;  $t_f$  – время до максимума тока;  $U$  – амплитуда напряжения на нагрузке;  $W$  – мощность на нагрузке;  $E$  – энергия, переданная в нагрузку;  $\eta = E/E_0 \times 100$  – эффективность передачи запасенной энергии  $E_0$  в нагрузку.

Таблица 4.3 – Параметры выходного импульса модуля из двух ЛТД ступеней. Зарядное напряжение ступеней 100 кВ

Нагрузка	$I$ , кА	$t_f$ , нс	$U$ , кВ	$W$ , ГВт	$E$ , кДж	$\eta$ , %
$R_{load}=0.07$ Ом, $L_{load}=2.5$ нГн 60 резисторов	902	168	66	58	11	69
$R_{load}=0.10$ Ом, $L_{load}=2.7$ нГн 45 резисторов	836	166	80	66	12	75
$R_{load}=0.14$ Ом, $L_{load}=3.0$ нГн 30 резисторов	694	158	103	71	13	81

Экспериментальные осциллограммы разряда модуля из двух ступеней показаны на рисунке 4.15.

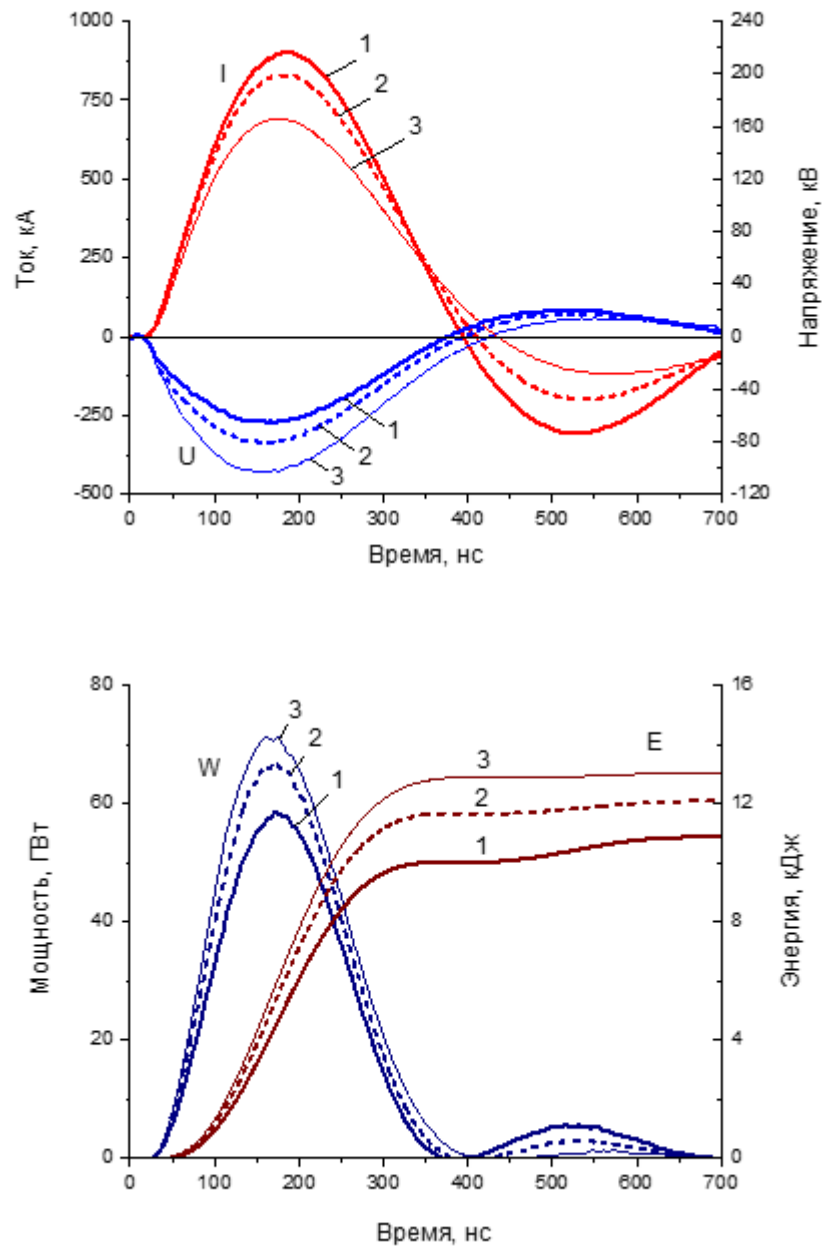


Рисунок 4.15 – Осциллограммы разряда модуля из двух последовательно включенных ЛТД ступеней на нагрузки 0.07 (1), 0.10 (2) и 0.14 (3) Ом:  $I$  – ток нагрузки;  $U$  – напряжение на нагрузке;  $W$  – мощность в нагрузке;  $E$  – энергия нагрузки

В экспериментах с нагрузкой  $R_{load}=0.1$  Ом,  $L_{load}=2.7$  нГн сопротивление и индуктивность нагрузки, приходящиеся на единичную ступень, составляют 0.05 Ом, 1.35 нГн. Сравнение с данными таблицы 4.2 для разряда единичной ступени на нагрузку  $R_{load}=0.05$  Ом,  $L_{load}=1$  нГн при зарядном напряжении 100 кВ показывает, что двукратное



увеличение числа ступеней позволило поднять мощность выходного импульса в  $\sim 1.9$  раза при сохранении эффективности передачи энергии в нагрузку на уровне 75 %.

#### 4.6 Сравнение ЛТД ступеней с воздушной и масляной изоляцией

Полученные результаты с двумя ступенями удобно использовать для сравнения двух подходов к созданию ЛТД генераторов. Первый подход (развиваемый в диссертационной работе) основан на использовании воздуха атмосферного давления в качестве изоляции внутри ступени и рабочей среды разрядников. Второй – использование масляной изоляции внутри ступени и воздуха при повышенном давлении внутри разрядников.

С использованием второго подхода создана самая мощная на момент выполнения диссертационной работы ступень LTDZ (подраздел 1.2.3) [70]. Первичный емкостной накопитель энергии этой ступени полностью идентичен эквивалентному емкостному накопителю двух последовательно включенных ступеней из подраздела 4.5: 40 параллельно включенных пар конденсаторов GA35426 (40 нФ, 100 кВ); в каждой паре конденсаторы включены последовательно и заряжаются до напряжения 100 кВ; запасаемая энергия 16 кДж. Параметры выходного импульса ступени с масляной изоляцией в режиме разряда с предельной пиковой мощностью приведены в таблице 4.4. Диаметр ступени LTDZ составляет 3 м; высота ступени – 0.22 м; объем ступени – 1.55 м<sup>3</sup>; запасаемая энергия, пересчитанная на единицу объема ступени, 10.3 кДж/м<sup>3</sup>.

Таблица 4.4 – Параметры выходного импульса ЛТД ступени с масляной изоляцией [70]. Зарядное напряжение  $\pm 100$  кВ

Нагрузка	$I$ , кА	$t_f$ , нс	$U$ , кВ	$W$ , ГВт	$E$ , кДж	$\eta$ , %
$R_{load}=0.1$ Ом, $L_{load}\approx 1$ нГн	1000	90	100	96	11.3	70

Объем сборки из двух последовательно включенных ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления 2.3 м<sup>3</sup>, что в 1.5 раза выше объема ступени с масляной изоляцией с тем же уровнем запасаемой энергии. Соответственно, запасаемая энергия, пересчитанная на единицу объема сборки из двух ступеней, в 1.5 раза ниже, чем в ЛТД ступени с масляной изоляцией. Согласно данным таблицы 4.3 для  $R_{load}=0.10$  Ом,  $L_{load}=2.7$  нГн и таблицы 4.4, снижение удельной запасаемой энергии в 1.5 раза

сопровождается уменьшением в  $\approx 1.4$  раза пиковой мощности вывода энергии в нагрузку без снижения эффективности передачи энергии.

#### **4.7 Проект ЛТД генератора электронного ускорителя для возбуждения газовой активной среды объемом 600 литров**

Ступень с током мегаамперного уровня создавалась для ЛТД генератора электронного ускорителя в усилителе лазерных импульсов с объемом газовой активной среды 600 литров. Техническое задание на усилитель: удельная мощность электронного пучка в газовом объеме 300–500 кВт/см<sup>3</sup> при напряжении 500–700 кВ, длительность импульса накачки 250 нс.

Предварительная оценка параметров ЛТД генератора для питания электронного диода выполнена из условия реализации верхней границы мощности накачки. При удельной мощности накачки 500 кВт/см<sup>3</sup> и объеме активной среды лазера  $6 \cdot 10^5$  см<sup>3</sup> требуемая мощность электронного пучка в газе составляет 0.3 ТВт. Энергия, введенная в газ, при длительности импульса 250 нс составляет 75 кДж. Необходимая запасаемая энергия генератора может быть оценена как 190 кДж с учетом потерь 50 % тока электронов за счет геометрической прозрачности выводного окна, потерь в материале выводного окна и утечек в вакууме с высоковольтных элементов диода, а также с учетом 80 % эффективности вывода энергии из емкостного накопителя ступеней. Исходя из энергозапаса единичной секции  $E_0=400$  Дж, требуемое число секций 480 шт.

Для получения напряжения  $U$  на уровне 700 кВ число последовательно включенных ступеней в модуле должно быть  $N=U/U_1 \approx 12$ , где  $U_1 \sim 55$  кВ – амплитуда напряжения на выходе единичной ЛТД ступени. Тогда число параллельно включенных секций должно быть  $M=480/N=40$  шт. Поскольку ступень с 40 секциями получается достаточно громоздкой и сложной в технологическом отношении, более целесообразным представляется вариант параллельного включения двух модулей с ЛТД ступенями, содержащими 20 секций. Такой вариант также предпочтительнее с точки зрения подвода энергии к секционированному диоду широкоапертурного сильноточного пучка. Эквивалентная емкость генератора составит 267 нФ, максимальная запасаемая энергия – 192 кДж. Отметим, что оценки выполнены для предельно допустимого зарядного напряжения конденсаторов секций 100 кВ.

Проектная конструкция генератора для питания электронного диода показана на рисунке 4.16. Элементы диода и газового объема включены в описание ниже для пояснения возможного исполнения ускорителя в целом. Конструкция этих элементов не являлась объектом рассмотрения диссертации.

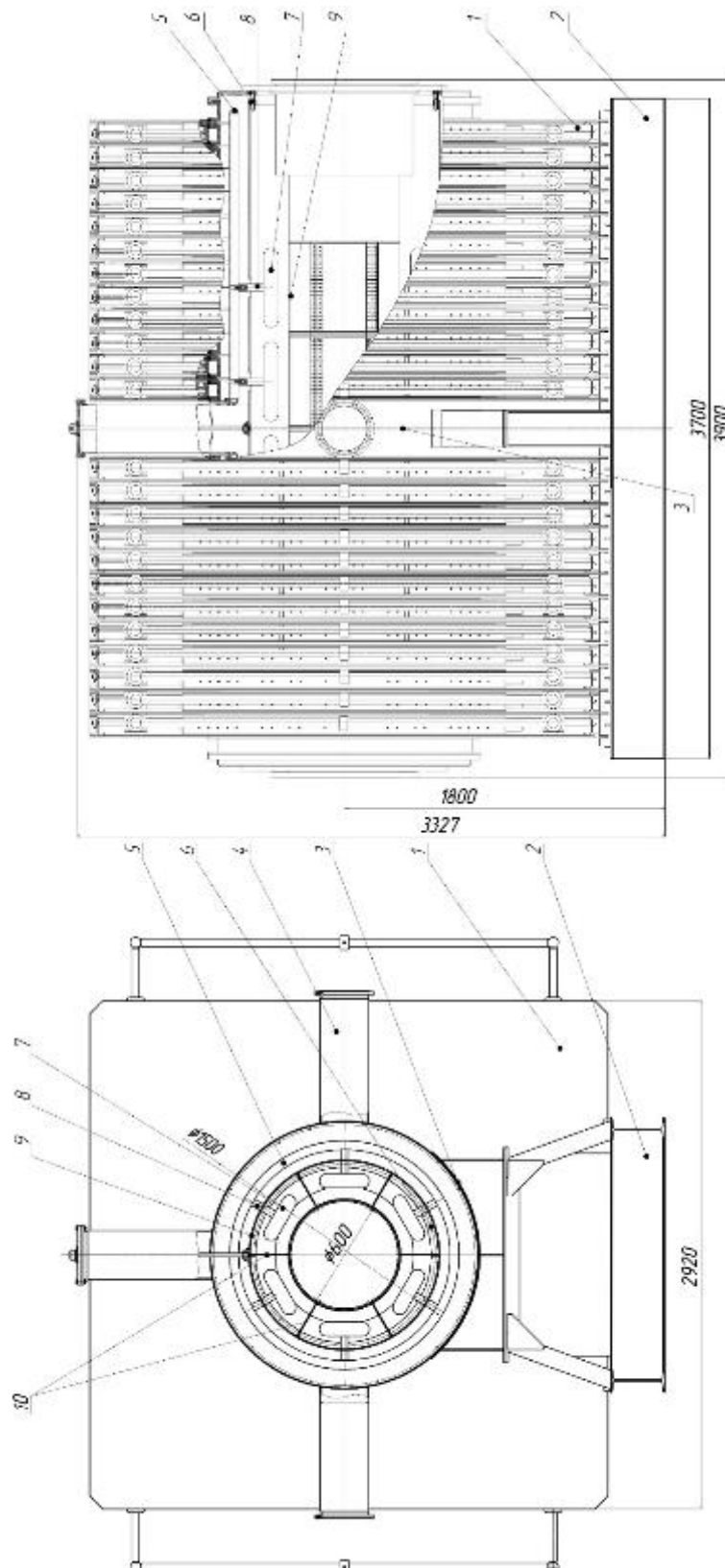


Рисунок 4.16 – Конструкция ЛТД генератора и лазерного усилителя на его основе

ЛТД ступени (1) расположены на основании (2) по 12 ступеней с каждой стороны относительно камеры (3). К камере через патрубки (4) подключаются вакуумные насосы. Цилиндры (5) служат обратным токопроводом в вакуумной линии генератора. Одним концом эти цилиндры прикреплены к камере. Энергия к катодам диода подводится по вакуумному коаксиалу, образованному цилиндрическими электродами (5) и (6). Катоды (7) подключаются к цилиндру (5) катододержателями (8). Газ активного объема находится внутри цилиндра (9). В зоне расположения катодов на цилиндре выполнены окна для вывода электронов в газ. Торцы цилиндра закрыты окнами для ввода и вывода оптического излучения. Цилиндры (6) и (9) соединяются между собой продольными пластинами (10). На рисунке 4.16 представлена конструкция с 24 катодами, расположенными по четыре в каждом из шести секторов. Подход к секционированию диода аналогичен отработанному в ускорителе, представленном в работах [87, 88]. Зарядные резисторы ЛТД ступеней расположены по двум сторонам генератора. Конструкция генератора предусматривает возможность извлечения цилиндра (9) для обслуживания окна для вывода электронов без разборки модулей. Также благодаря воздушной изоляции возможны ревизия и ремонт любой ЛТД ступени без полной разборки и нарушения вакуума внутри выходной линии и в объеме диода.

Габаритные размеры усилителя:  $4 \text{ м} \times 3.5 \times 3.5 \text{ м}$ . Ориентировочная масса конструкции 30 тонн.

Электрическая схема замещения генератора приведена на рисунке 4.17. Схема составлена в соответствии с конструкцией генератора на рисунке 4.16. Каждый из двух параллельно включенных модулей представлен двухполюсниками ( $A_{1-1} - A_{1-12}$ ), ( $A_{2-1} - A_{2-12}$ ), моделирующими ЛТД ступени, и линиями  $T_1$ . Линия  $T_1$  – вакуумный коаксиал, образованный цилиндрическим проводником ступени и цилиндром (5), на длине ступени. Индуктивности  $L_3$ ,  $L_5$  образованы проводниками (5) и (6) вакуумного коаксиала, подводящего энергию к диоду. При отношении диаметров проводников 1220 мм/1120 мм получаем  $L_3 \approx 8.9 \text{ нГн}$ ,  $L_5 \approx 17.8 \text{ нГн}$ . Электронный диод моделируется в схеме постоянными резисторами  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  и индуктивностью  $L_4$ . Индуктивность  $L_4 \approx 20 \text{ нГн}$  – эквивалентная индуктивность шести катододержателей (8). Индуктивность  $L_6$  – это индуктивность объема между двумя модулями. В штатном режиме падение напряжения на индуктивности  $L_6$  отсутствует.

Двухполюсники  $A_{1-1} - A_{1-12}$  замещают 20 параллельно включенных секций ступени. Схема этих двухполюсников для моделирования в численном коде PSpice [137] приведена на рисунке 4.18. Схема идентична схеме единичной секции. Параметры электрической схемы секций, методика моделирования и ее обоснование приведены в подразделе 3.5. Двухполюсники  $A_{2-1} - A_{2-12}$  замещают индуктора ступеней. Индуктивность  $L_1 \approx 1.5$  нГн – это эквивалентная индуктивность передающей линии между секциями сегментов и цилиндрическим проводником (индуктивность сборного электрода).

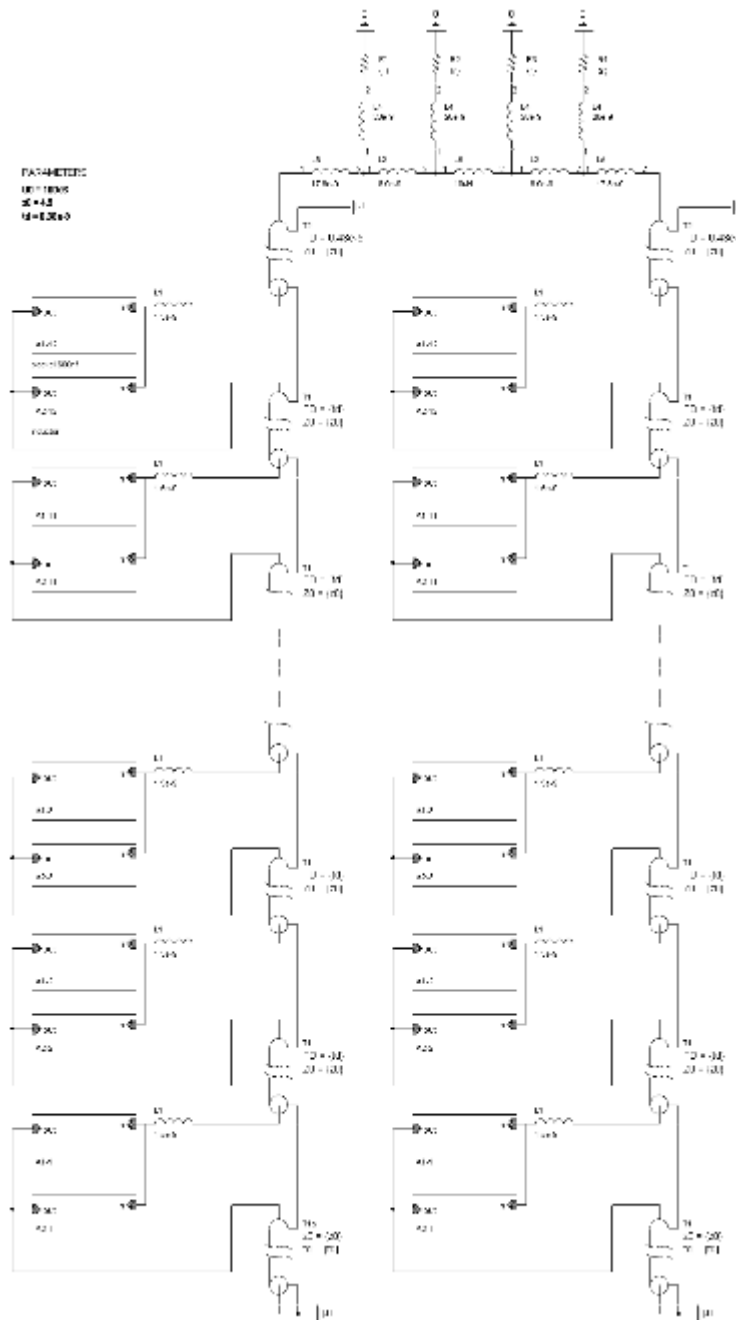


Рисунок 4.17 – Электрическая схема замещения ЛТД генератора из двух параллельно включенных модулей

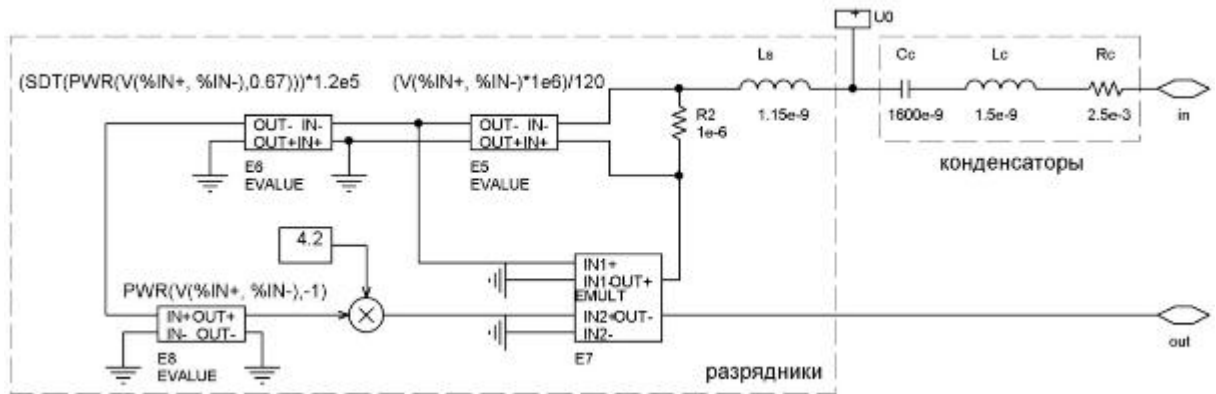


Рисунок 4.18 – Электрическая схема замещения двадцати параллельных секций 80 нФ для численного кода PSpice:  $C_C$ ,  $L_C$ ,  $R_C$  – эквивалентные параметры конденсаторов двадцати секций;  $L_S$  – эквивалентная индуктивность двадцати разрядников

В расчетном отношении индуктор с ферромагнитным сердечником можно представить в виде параллельно включенных нелинейной индуктивности  $L_i(t)$  и резистора  $R_i$ , который моделирует потери энергии в сердечнике, связанные с протеканием вихревых токов. Вкладом в потери за счет магнитной вязкости и магнитного гистерезиса пренебрегается в силу его незначительности.

Индуктивность индуктора в основном определяется объемом, занятым сердечниками:

$$L_t \approx \frac{\mu_0 \mu_1 S_t}{\ell_t} \approx 8 \cdot 10^{-10} \mu_1, \quad (4.3)$$

где  $\ell_t = 5.1$  м – длина средней линии сердечника;

$S_t = 3.2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup> – площадь поперечного сечения сердечника с учетом коэффициента заполнения;

$\mu_1$  – средняя относительная магнитная проницаемость сердечника в ненасыщенном состоянии, которая оценивается из выражения [145]:

$$\mu_1 = \frac{8\rho\tau}{\mu_0\delta^2}, \quad (4.4)$$

где  $\tau$  – длительность импульса;

$\rho$  – удельное сопротивление материала сердечника.

Принимая удельное сопротивление электротехнической стали ЭТ3425 равным  $\rho = 5 \cdot 10^{-7}$  Ом·м и толщину стальной ленты  $\delta = 50 \cdot 10^{-6}$  м, имеем

$$\mu_1 \approx 1.3 \cdot 10^9 \times \tau. \quad (4.5)$$

Для  $\tau \approx 300$  нс относительная магнитная проницаемость  $\mu_1 \approx 400$ . Тогда из (4.3) имеем индуктивность объема с сердечником в ненасыщенном состоянии  $L_r \approx 300$  нГн. В насыщенном состоянии относительная магнитная проницаемость многослойных сердечников  $\mu_1 \approx 4-7$  [141], т.е. индуктивность контура индуктора снижается на два порядка.

До насыщения сердечников ток в индукторе определяется составляющей, связанной с вихревым током. Вихревой ток определяется процессом проникновения электромагнитного поля в электротехническую сталь сердечников, но для инженерных расчетов в схеме замещения индуктора можно использовать постоянное сопротивление [147–149]:

$$R_t = 8 \frac{\rho S}{\ell \delta^2} \approx 1 \text{ Ом.} \quad (4.6)$$

Расчетное значение  $R_t$  подтверждается и экспериментальными осциллограммами на рисунке 4.9. Действительно, до насыщения сердечников ток в индукторе определяется в основном активным сопротивлением сердечника и потери энергии на перемагничивание составляют

$$E(t_c) = \int_0^{t_c} (U \cdot I_i) dt \approx 530 \text{ Дж,} \quad (4.7)$$

где  $t_c$  – время до насыщения сердечников. Тогда эквивалентное сопротивление сердечника, обеспечивающее этот уровень потерь в течение времени  $t_c$

$$R_t \approx \frac{\int_0^{t_c} U^2 \cdot dt}{E(t_c)} \approx 1 \text{ Ом.} \quad (4.8)$$

На рисунке 4.19 показана электрическая схема двухполюсника  $A2$ , замещающая индуктор ступени, для численного кода PSpice. Постоянное сопротивление  $R_t = 1$  Ом имитирует потери энергии в сердечниках. В модели принимается, что в момент достижения интегралом напряжения величины  $\int_0^t U \cdot dt = 11$  мВ·с относительная магнитная проницаемость сердечника  $\mu_1$  скачком меняется от 400 до 4, а индуктивность меняется от  $L_{t2} = 300$  Гн до  $\frac{L_{t2} L_{t3}}{L_{t2} + L_{t3}} \approx L_{t3} = 3$  нГн.

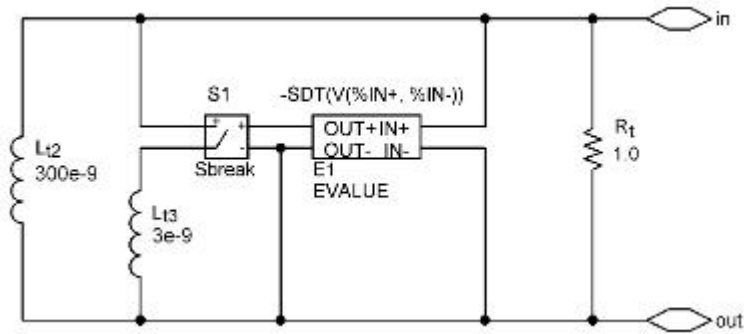


Рисунок 4.19 – Электрическая схема индуктора ступени для численного кода PSpice

Примеры расчетов выходных параметров генератора для трех режимов разряда при зарядном напряжении 100 кВ приведены на рисунках 4.20–4.22.

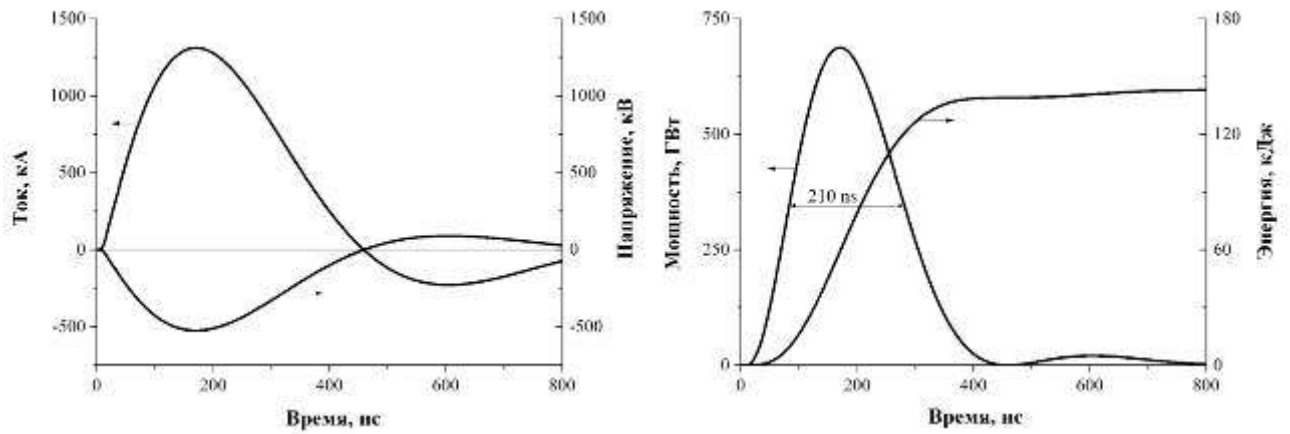


Рисунок 4.20 – Расчетные кривые разряда генератора на нагрузку 0.4 Ом ( $R_1=R_2=R_3=R_4=1.6$  Ом)

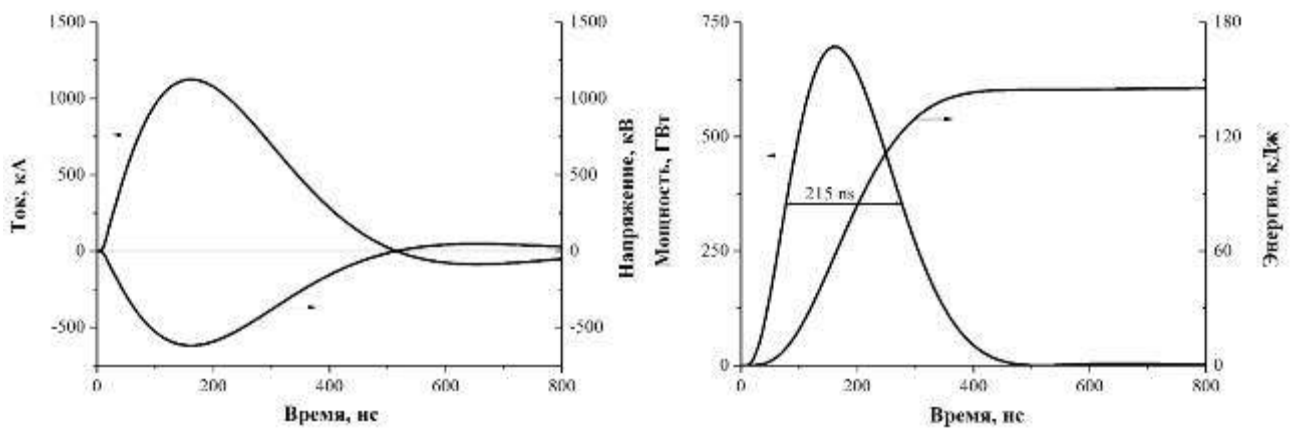


Рисунок 4.21 – Расчетные кривые разряда генератора на нагрузку 0.55 Ом ( $R_1=R_2=R_3=R_4=2.2$  Ом)



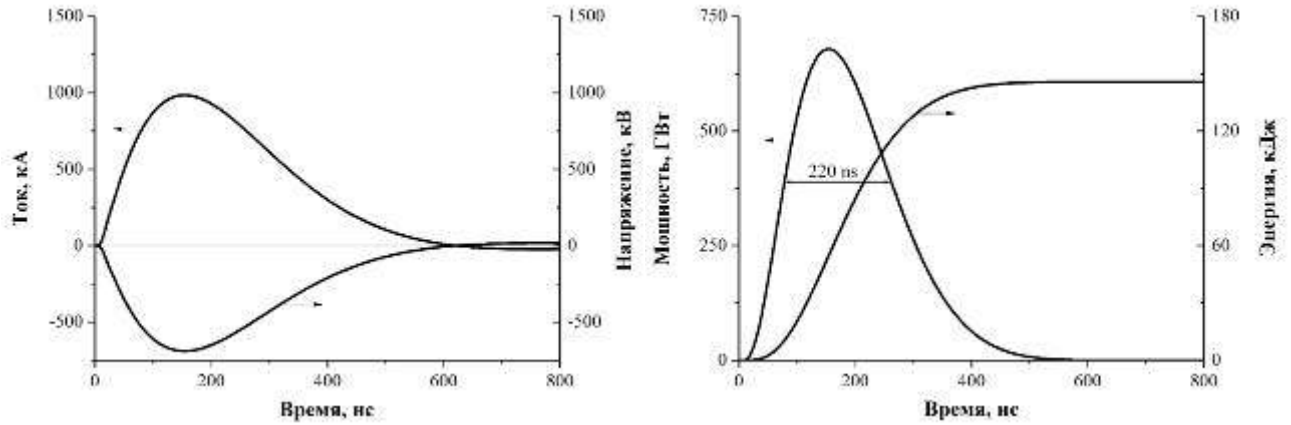


Рисунок 4.22 – Расчетные кривые разряда генератора на нагрузку 0.7 Ом ( $R_1=R_2=R_3=R_4=2.8$  Ом)

Результаты расчетов обобщены в таблице 4.5. Помимо напряжения на нагрузке  $U_{load}$ , тока в нагрузке  $I_{load}$  и мощности  $W_{load}$  в таблице представлены следующие характеристики:

$\tau_{1/2}$  – длительность импульса мощности на половине максимального значения;

$E_{load}$  – энергия, введенная в нагрузку в течении первой полуволны напряжения;

$E_\tau$  – энергия, введенная в нагрузку при уровне мощности не менее половины максимального значения;

$W_\tau = E_\tau / \tau_{1/2}$  – средняя мощность при времени ввода энергии  $\tau_{1/2}$ ;

$W' = 0.5 \cdot E_\tau / \tau_{1/2} \cdot V$  – средняя удельная мощность накачки при времени  $\tau_{1/2}$  с учетом потерь 50 % энергии при выводе электронов в газ объемом  $V=600$  литров.

Таблица 4.5 – Расчетные параметры ЛТД генератора для электронного ускорителя

Нагрузка $R_1=R_2=$ $R_3=R_4,$ Ом	$U_{load},$ кВ.	Реверс напряжения, %	$I_{load},$ МА	$t_f,$ нс	$W_{load},$ ГВт	$\tau_{1/2},$ нс	$E_{load},$ кДж	$E_\tau,$ кДж	$W_\tau,$ ГВт	$W',$ кВт/см <sup>3</sup>
1.6	525	17	1.31	170	688	200	139	111	555	462
2.2	620	8	1.13	160	700	200	145	114	570	475
2.8	690	2	0.99	155	683	200	146	114	570	475

Из данных таблицы 4.5 следует, что во всех трех режимах средняя удельная мощность накачки газа активного объема близка к 500 кВт/см<sup>3</sup> при условии 50 % потерь при выводе электронов в газ. Пиковая мощность превышает среднюю более чем на

20 %. Длительность импульса мощности на половине максимального значения составляет 200 нс.

При изменении сопротивления диода в диапазоне 0.4–0.7 Ом удельная мощность накачки изменяется слабо в пределах 5 %. Для работы генератора более предпочтителен режим с сопротивлением диода более 0.5 Ом, поскольку в этом случае амплитуда напряжения после смены полярности незначительная. Режим с большим сопротивлением диода также предпочтителен для решения проблемы устойчивости выводного окна для электронного пучка.

В емкостном накопителе генератора запасется энергия до 190 кДж, а в диоде выделяется 140–145 кДж в зависимости от сопротивления диода. Основные потери энергии приходятся на разрядники и составляют  $\approx 25$  кДж при разряде на диод с сопротивлением 0.4 Ом и  $\approx 21$  кДж при разряде на диод с сопротивлением 0.7 Ом. Потери энергии в сердечниках индукторов при их перемагничивании в течение основного импульса составляют  $\approx 12$  кДж при разряде на диод с сопротивлением 0.4 Ом и  $\approx 16$  кДж при разряде на диод с сопротивлением 0.7 Ом.

#### 4.8 Выводы

Создана ЛТД ступень с изоляцией воздухом атмосферного давления, позволяющая получить при зарядном напряжении 100 кВ на нагрузке 0.05 Ом импульс с мощностью  $\approx 35$  ГВт и током  $\approx 850$  кА с временем нарастания по уровню 0.1–0.9 менее 100 нс. По совокупности характеристик эта ступень не имеет аналогов. Её отличительной особенностью является возможность проведения профилактических и ремонтных работ емкостного накопителя без полной разборки ступени, что особенно важно в крупных установках, использующих модули, составленные из большого числа последовательно включенных ступеней.

Ступень может использоваться в качестве элементной базы при строительстве мощных ЛТД генераторов с током порядка  $10^6$  А, напряжением порядка  $10^6$  В без использования трансформаторного масла и разрядников с избыточным давлением газа. Разработан проект ЛТД генератора с двумя параллельно включенными модулями в составе 12 мегаамперных ступеней с общим энергозапасом 190 кДж и пиковой мощностью 700 ГВт.

## 5 ЛТД генератор для фемтосекундной лазерной системы THL-100

### 5.1 Конструкция газового усилителя на основе ЛТД генератора

В ИСЭ СО РАН совместно с ФИАН создана уникальная мультитераваттная гибридная фемтосекундная лазерная система видимого диапазона THL-100 [150–152]. Система включает твердотельный Ti:сапфировый стартовый лазерный комплекс и газовый XeF(C-A) усилитель.

Фотодиссоционный XeF(C-A) усилитель (рисунки 5.1 и 5.2) включает в себя высоковольтный импульсный генератор в составе двух модулей из двенадцати ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления, вакуумную камеру с электронным диодом, газовую камеру с ксеноном и лазерную кювету с зеркальной системой для многопроходного усиления лазерного импульса [153, 154]. Единичная ступень ЛТД модуля содержит четыре секции 80 нФ, таким образом, суммарная емкость накопителя ступени составляет 320 нФ. Суммарное число секций в модуле – 48 шт. Запасаемая энергия в каждом модуле при зарядном напряжении 100 кВ составляет 19.2 кДж, в генераторе из двух модулей – 38.4 кДж.

Центральные проводники вакуумных линий двух модулей соединяются с двумя катододержателями, на которых установлено по три взрывоэмиссионных катода (флок на металле). Все шесть катодов симметрично расположены вокруг цилиндрической газовой камеры диаметром 450 мм. Стенка камеры служит анодом вакуумного диода. Она выполнена в виде решеток из нержавеющей стали, закрытых фольгой из титана толщиной 40 мкм. Анод-катодный зазор в диоде составляет 35–50 мм. В вакуумном диоде формируются шесть электронных пучков шириной 100 мм и длиной 1200 мм, инжектируемых внутрь газовой камеры с ксеноном при давлении 3 атм. Конструкция генератора предусматривает возможность обслуживания окон для вывода электронов в газ без разборки модулей ЛТД генератора. Также возможно проведение ревизии и ремонта любой ЛТД ступени без нарушения вакуума внутри выходных линий и в объеме диода.

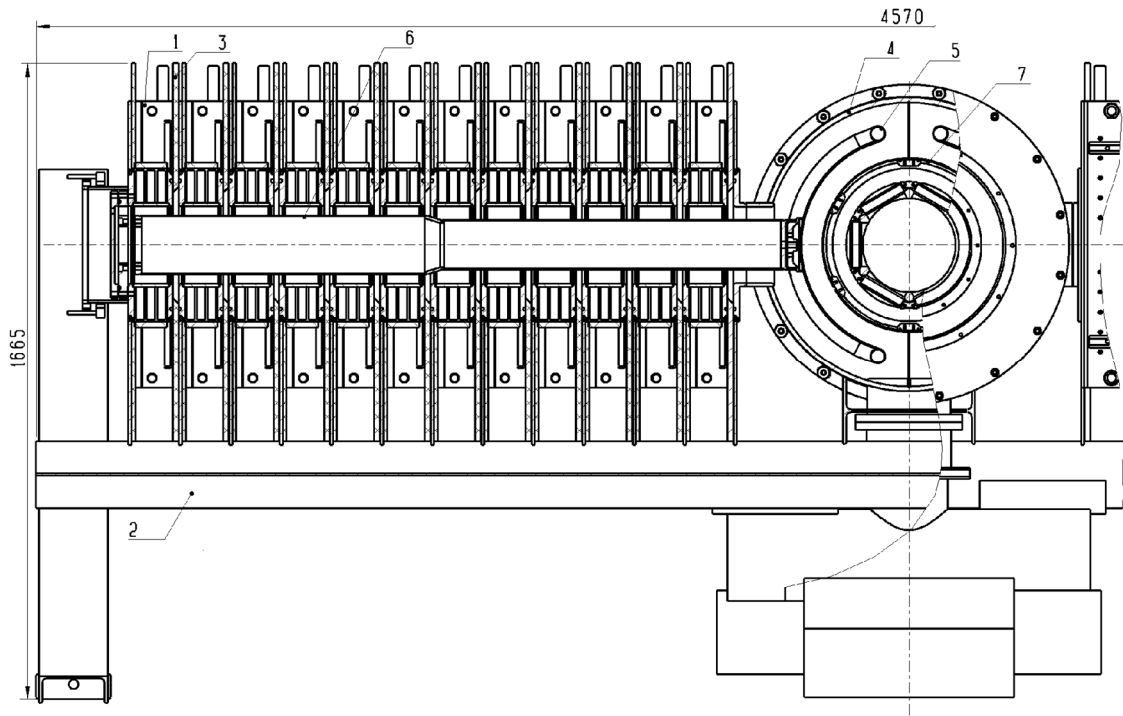


Рисунок 5.1 – Конструкция газового усилителя на основе ЛТД генератора из двух модулей (на рисунке показан один модуль): 1 – ЛТД ступень; 2 – основание ускорителя; 3 – вакуумный изолятор ступени; 4 – вакуумная камера; 5 – катододержатель; 6 – центральный проводник вакуумной линии; 7 – корпус газового объема

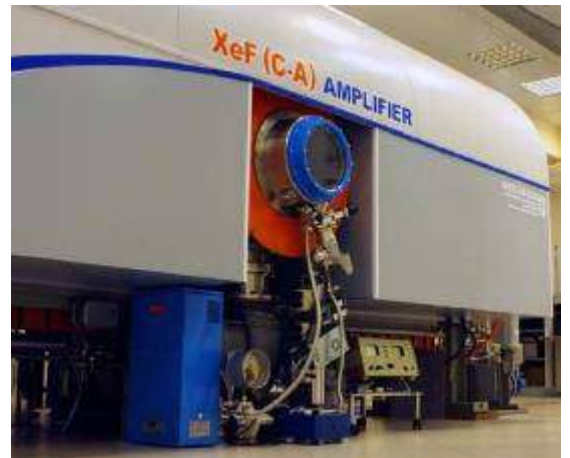


Рисунок 5.2 – Фотографии ЛТД генератора в составе двух модулей из двенадцати ступеней (слева) и XeF(C-A) усилитель мультитераваттной фемтосекундной лазерной системы THL-100 в сборе (справа)

## 5.2 Ступень ЛТД генератора

Конструкция ЛТД ступени приведена на рисунке 5.3. Четыре секции 80 нФ разделены на два параллельно включенных сегмента из двух секций. Сегменты расположены по узким сторонам опорной плиты (2) и прикреплены к плите низковольтной стороной. Секции (3) размещены на основании из швеллера (1) и прижаты

к нему плитой из дельта-древесины с помощью трех шпилек из капролона. Крайняя секция в сегменте имеет проходной изолятор (4), через который к конденсаторам подводится зарядное напряжение до 100 кВ. Между секциями также установлен проходной изолятор для передачи зарядного напряжения из секции в секцию. Выводы секций соединены со сборным электродом (5). К этому электроду крепится и внешний цилиндрический проводник вакуумной выходной линии диаметром 200 мм (6). Вакуумный и воздушный объемы ступени разделены изолятором из оргстекла (7) высотой 15 мм.

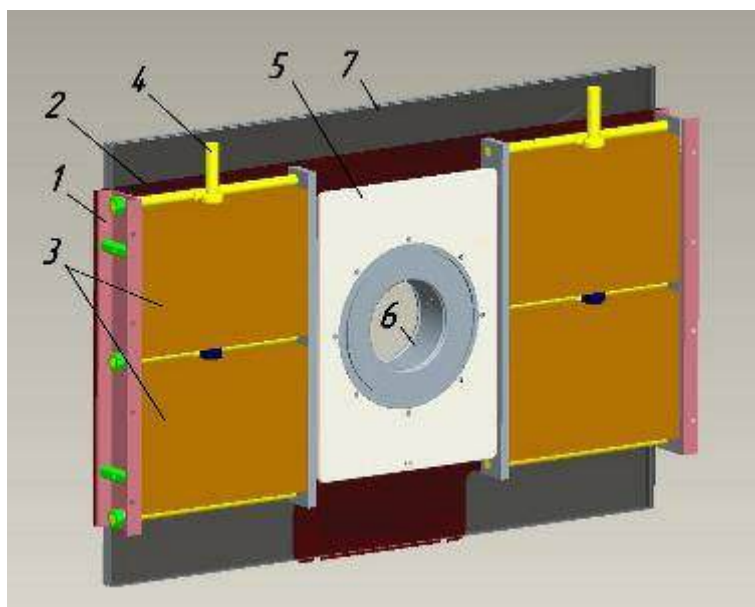


Рисунок 5.3 – Конструкция ЛТД ступени с четырьмя секциями: 1– низковольтный сборный электрод двух секций; 2– опорная плита; 3– секции; 4– высоковольтный ввод для зарядного напряжения; 5– высоковольтный сборный электрод; 6– внешний проводник вакуумной выходной линии; 7– изолятор

Сердечник ступени содержит три кольца из ленты электротехнической стали ЭТ3425 толщиной  $\delta=0.05$  мм. Длина средней линии сердечника  $\ell$  составляет около 1 м. Площадь поперечного сечения  $S$  трех сердечников с учетом коэффициента заполнения  $3.6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Подмагничивание сердечников осуществляется от дополнительного генератора (100 мкФ, 3 кВ), обеспечивающего ток подмагничивания амплитудой  $\sim 1$  кА с временем нарастания 60 мкс. Разрядники ЛТД ступени запускаются в момент достижения током подмагничивания амплитудного значения при напряженности поля подмагничивания 1 кА/м и магнитной индукции  $B_s \approx 1.8$  Тл. При полном перемагничивании сердечника импульсом ступени максимальный перепад индукции

составляет  $\Delta B=2B_s \approx 3.6$  Тл. Вольт-секундный интеграл сердечника, соответствующий полному перемагничиванию, равен 13 мВ·с.

Габаритные размеры ЛТД ступени: 750 мм × 1510 мм × 132 мм.

### 5.3 Модуль из шести ЛТД ступеней

На первом этапе был создан и запущен модуль в составе шести ЛТД ступеней [155], представляющий собой половину модуля генератора фемтосекундного лазерного комплекса THL-100. Основное назначение модуля состояло в испытании ЛТД ступеней, отработке схемных и конструктивных решений, получении выходных характеристик для сравнения с проектными и т.д. перед строительством полноразмерного ЛТД генератора. В дальнейшем этот модуль был использован в качестве отдельного генератора для исследовательских целей (подразделы 7.3–7.5).

#### 5.3.1 Конструкция модуля и система регистрации

Фотография и конструкция модуля из шести ЛТД ступеней из четырех секций 80 нФ представлены на рисунке 5.4. Габаритные размеры модуля вместе с вакуумной системой 1.5 м × 1.5 м × 1.3 м. Модуль занимает площадь менее 2.5 м<sup>2</sup>.

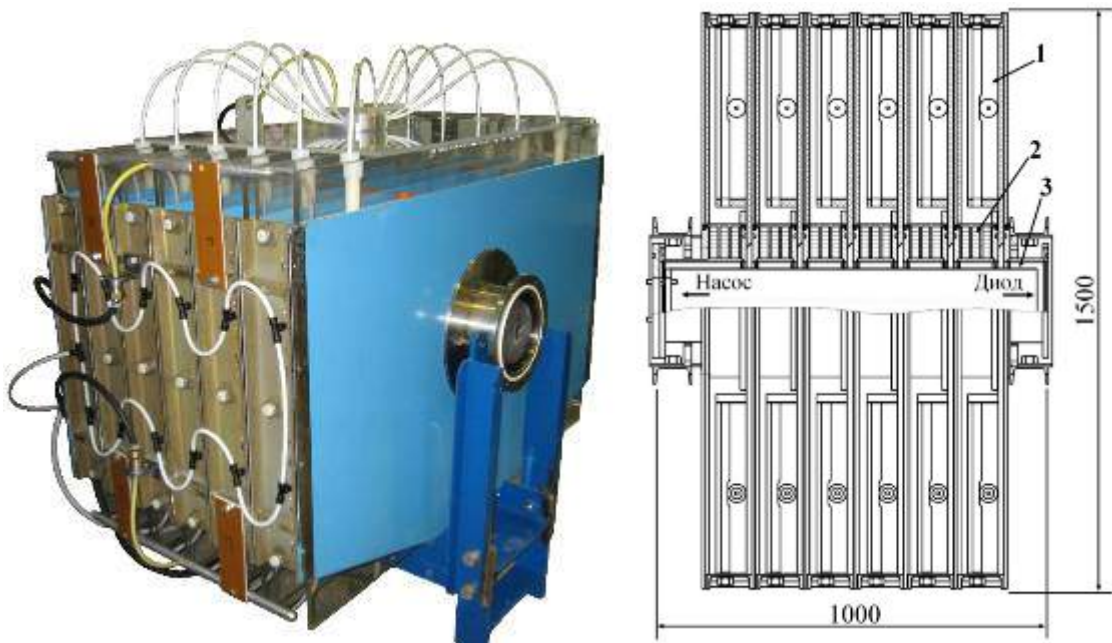


Рисунок 5.4 – Фотография и конструкция (вид сверху) модуля в составе шести ЛТД ступеней без системы откачки и нагрузки: 1 – секция ступени; 2 – сердечник ступени; 3 – выходная вакуумная коаксиальная линия

Блок-схема модуля дана на рисунке 5.5. Конденсаторы ступеней заряжаются через ограничительные сопротивления  $R_{z1}–R_{z6}$  напряжением положительной полярности. Импульс тока подмагничивания подается на индукторы ступеней  $Li_1–Li_6$  через резисторы  $R_1–R_6$  от генератора подмагничивания. Запуск разрядников ЛТД ступеней производится путем подачи напряжения на управляющие электроды от пускового генератора. После срабатывания разрядников ЛТД ступени включаются последовательно на суммарную индуктивность вакуумной линии  $T_1–T_6$  и сопротивление нагрузки  $R_{load}$ .

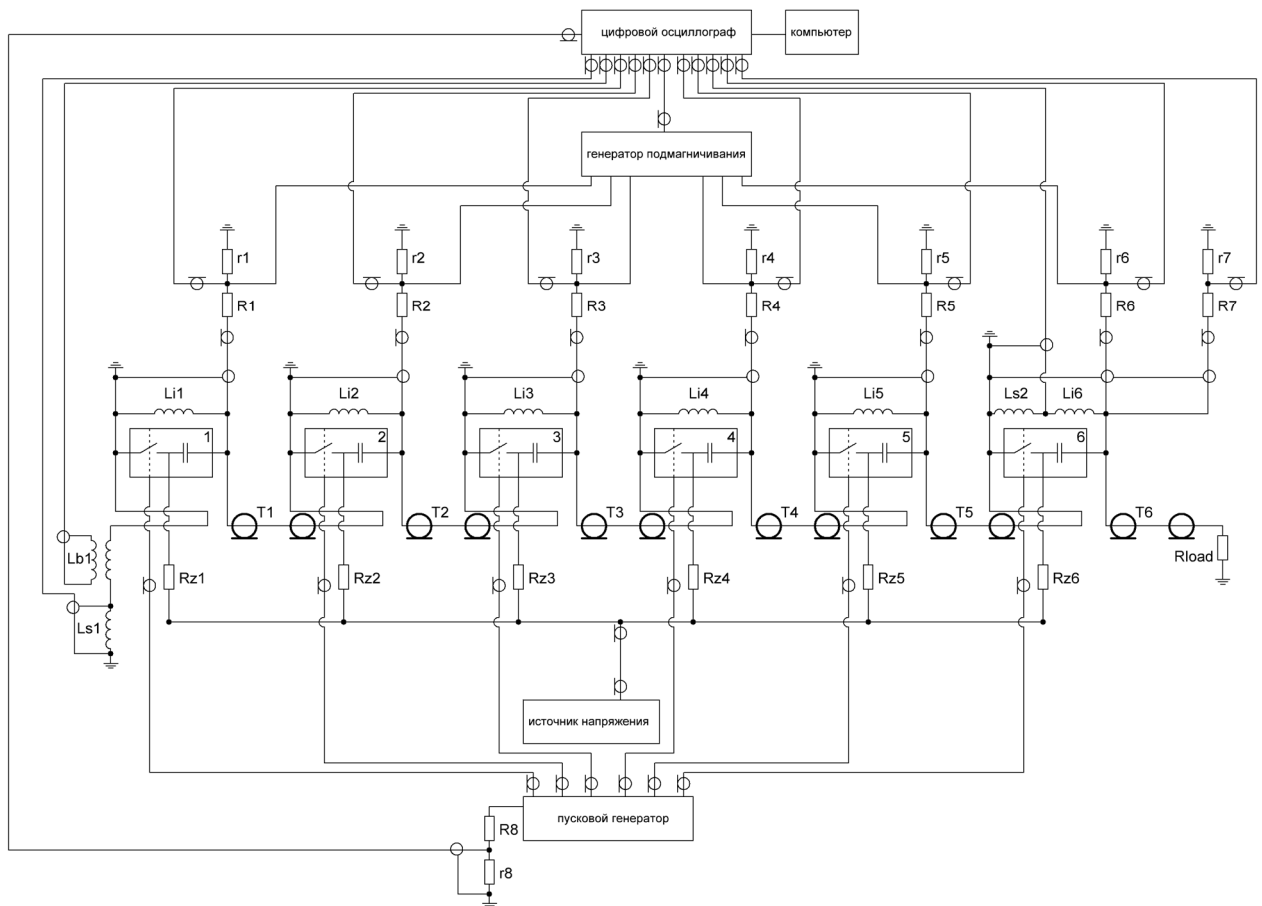


Рисунок 5.5 – Блок-схема модуля из шести ЛТД ступеней

Для измерения напряжения на выходе ступеней используются резистивные делители напряжения  $R_1r_1–R_6r_6$  и делитель  $R_7r_7$ . Напряжение пускового генератора измеряется резистивным делителем  $R_8r_8$ . Производная тока в разрядном контуре генератора измеряется магнитным зондом  $Lb_1$  и индуктивным датчиком  $Ls_1$ , производная тока в контуре индуктора ступени измеряется индуктивным шунтом  $Ls_2$ . Помимо указанных на блок-схеме датчиков, также устанавливались датчики тока в нагрузке.

Из сигналов с датчиков производной тока и делителей напряжений вычисляются напряжение, сопротивление, мощность и энергия в нагрузке.

### 5.3.2 Параметры модуля

Суммарное число секций 80 нФ в модуле составляет 24 шт. Запасаемая энергия в при зарядном напряжении 100 кВ – 9.6 кДж.

На рисунке 5.6 приведены расчетные значения выходной мощности модуля и выведенной в нагрузку энергии в зависимости от сопротивления нагрузки. Зависимости получены из моделирования полной схемы замещения с учетом коммутационной характеристики разрядников и потерь энергии в сердечниках, аналогично моделированию в подразделе 4.7. При отношении диаметров проводников выходной вакуумной линии 200 мм / 168 мм максимальные выходная мощность и эффективность передачи энергии достигаются при сопротивлении нагрузки 1.5–2.5 Ом.

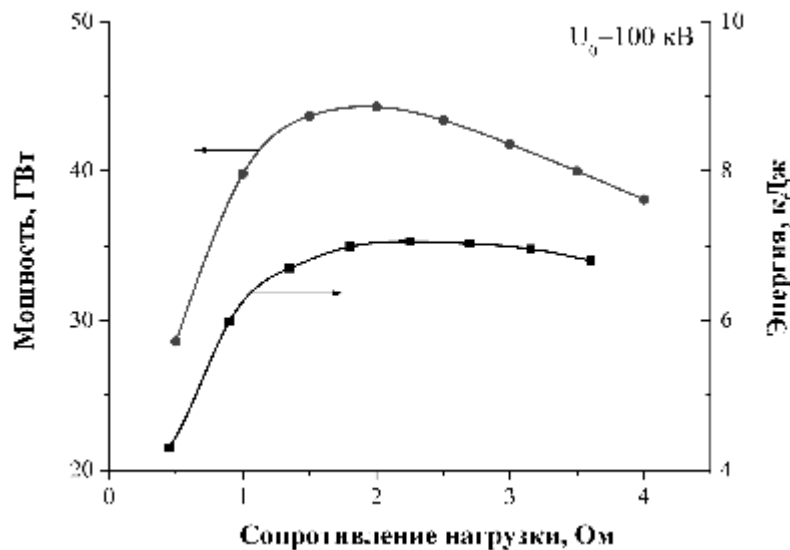


Рисунок 5.6 – Расчетные зависимости выходной мощности модуля в составе шести ЛТД ступеней (●) и переключенной энергии (■) от сопротивления нагрузки при зарядном напряжении 100 кВ. Отношение диаметров проводников выходной вакуумной линии 200/168 мм

Для реализации в вакууме нагрузки с сопротивлением в единицы Ом предложено использовать цилиндрический электронный диод, работающий в режиме магнитной самоизоляции [156]. Отличительной особенностью такого диода является возможность реализации квазипостоянного сопротивления в течение нескольких сотен наносекунд. Диод по существу является магнитоизолированной коаксиальной линией с разомкнутым



центральным проводником. Ток цилиндрического диода в режиме магнитной самоизоляции и его сопротивление оценивался в рамках гидродинамического рассмотрения [157, 158], где релятивистский фактор, соответствующий напряжению в слое электронов, определялся в приближении предельного тока [159, 160]. На рисунке 5.7 приведены расчетные зависимости тока в цилиндрическом диоде от напряжения для указанного приближения. Расчет выполнен для цилиндрического диода с соотношениями диаметров электродов 200 мм / 168 мм и 200 мм / 129 мм. Для этих соотношений в представляющем интерес диапазоне напряжений реализуется сопротивление  $\approx 3$  Ом и  $\approx 10$  Ом.

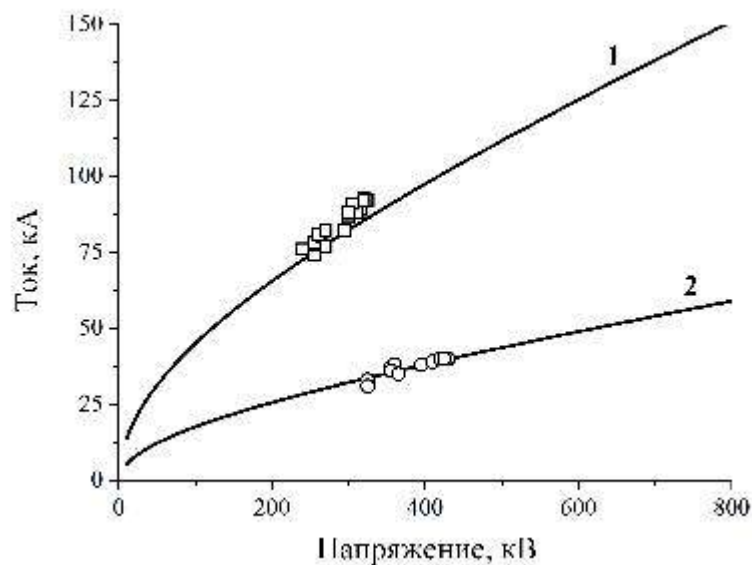


Рисунок 5.7 – Зависимости тока цилиндрического диода от напряжения, рассчитанные в приближении предельного тока (сплошные линии), при соотношении диаметров электродов диода 200 мм/168 мм (1) и 200 мм/129 мм (2). □, ○ – экспериментальные данные для диодов 200 мм/168 мм и 200 мм/129 мм, соответственно

В ЛТД модуле цилиндрический диод, был образован электродами выходной вакуумной коаксиальной линии (рисунок 5.8). Катодом диода является поверхность внутреннего проводника коаксиала диаметром  $D=168$  либо 129 мм, покрытая на длине 276 мм бархатом. Анодом служит внешний проводник коаксиала диаметром 200 мм. Аксиальный зазор между торцом катодной трубы и торцом анодной трубы составлял 110 мм и существенно превышал зазор в радиальном направлении. Помимо тока генератора  $I_0$  в начале вакуумной коаксиальной линии измерялся ток электронного пучка диода индуктивными датчиками ( $I_1$ – $I_4$ ) [161], установленными на аноде вдоль оси диода. Расстояние между соседними датчиками 80 мм. Поясом Роговского ( $I_5$ ) регистрировался ток, замыкающийся на торцевой фланец анодной трубы.

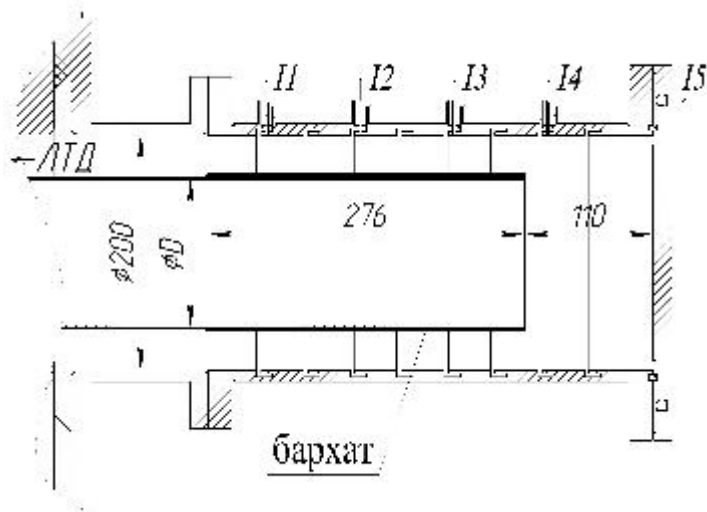


Рисунок 5.8 – Цилиндрический диод:  $I_1$ - $I_4$  – индуктивные датчики;  $I_5$  – пояс Роговского

Вакуумный объем откачивался турбомолекулярным насосом ТМН-500 до остаточного давления не выше  $5 \cdot 10^{-5}$  Торр.

Разряд модуля на электронный диод с соотношением диаметров электродов 200 мм / 168 мм при зарядном напряжении 98 кВ иллюстрирует рисунок 5.9. Амплитуда тока емкостного накопителя модуля  $I_g$  достигает 130 кА, из них 112 кА протекает в диоде и 18 кА – в индукторе ЛТД ступеней. Напряжение на диоде  $U_d$  достигает 375 кВ, напряжение на выходе каждой из шести ступней превышает 60 кВ. В диод выводится энергия за характерное время 170 нс (время по уровню (0.1-0.9) от амплитудного значения) с пиковой мощностью около 40 ГВт.

Сопротивление диода  $R_d$  выходит на уровень 3.5 Ом и остается практически постоянным в течение 100 нс (рисунок 5.10). В течение последующих 170 нс величина  $R_d$  медленно снижается до уровня 2 Ом вследствие радиального движения электродной плазмы. Таким образом, в вакууме реализована квазипостоянная резистивная нагрузка с сопротивлением в единицы Ом, необходимым для реализации выходной мощности модуля, близкой к максимальной.

На рисунке 5.11 показаны сигналы токов на фронте импульса напряжения. На начальной стадии цилиндрический диод работает в режиме ограничения тока пространственным зарядом. По мере нарастания тока траектории электронов начинают искривляться. Полный ток диода начинает расти медленнее, чем это следует из закона Чайлда-Лэнгмюра. За время около 60 нс токи  $I_1$ - $I_3$ , измеряемые на анодной трубе вдоль

области эмитирующей поверхности диода, практически сходятся. Этот момент времени интерпретируется как время установления магнитной самоизоляции.

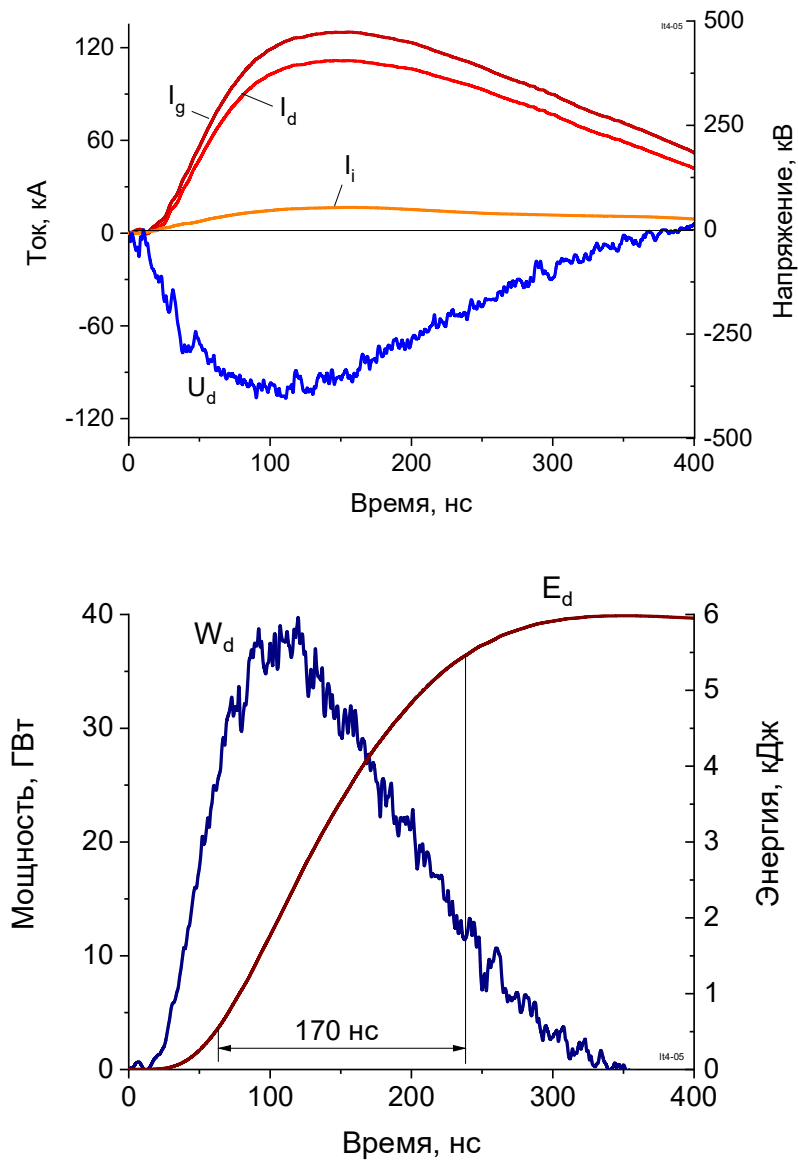


Рисунок 5.9 – Осциллограммы разряда ЛТД модуля на цилиндрический диод с отношением диаметров электродов 200 мм/168 мм:  $I_g$ ,  $I_d$ ,  $I_i$  – полный ток емкостного накопителя модуля, токи в диоде и индукторе;  $U_d$  – напряжения на диоде;  $W_d$ ,  $E_d$  – мощность и энергия в диоде. Зарядное напряжение 98  $\text{kV}$

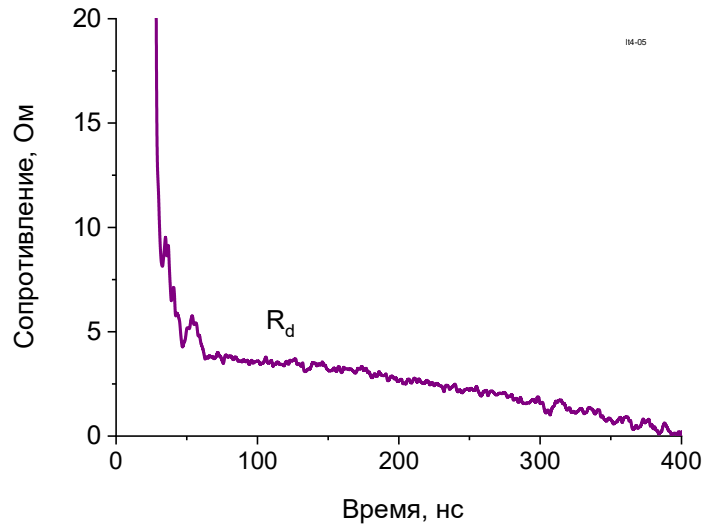


Рисунок 5.10 – Сопротивление цилиндрического диода с отношением диаметров электродов 200 мм/168 мм

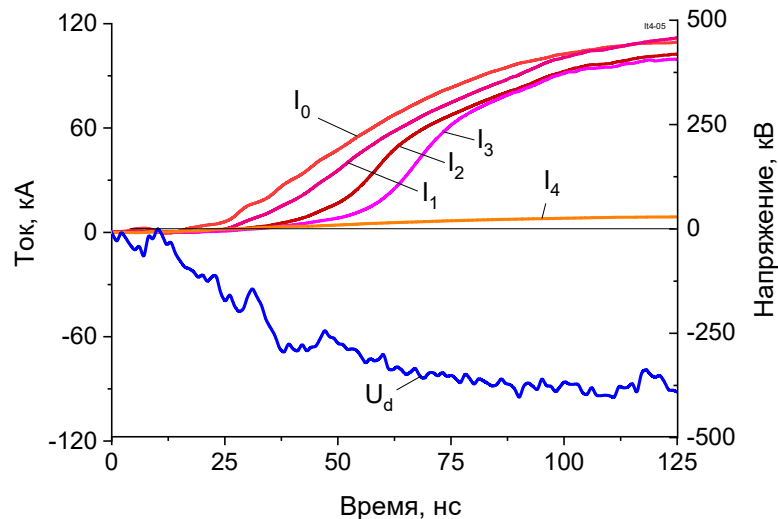


Рисунок 5.11 – Осциллограммы токов  $I_0$ – $I_4$  и напряжения  $U_d$  разряда ЛТД модуля на цилиндрический диод с отношением диаметров электродов 200 мм/168 мм в короткой временной развертке

Экспериментальные данные, полученные при изменении зарядного напряжения ступеней модуля в диапазоне 70–100 кВ в момент времени установления магнитной самоизоляции, помещены на расчетную зависимость на рисунке 5.7. Видно, что экспериментальные данные удовлетворительно ложатся на кривую, рассчитанную в приближении предельного тока, что свидетельствует об оправданности использования данного подхода.

Результаты испытания модуля из шести ступеней при использовании диода с соотношением диаметров электродов 200 мм / 168 мм обобщены в таблице 5.1. Из данных таблицы следует, что увеличение зарядного напряжения сопровождается пропорциональным ростом напряжения на диоде. При увеличении зарядного напряжения от 70 кВ до 100 кВ мощность генератора возрастает двукратно с 19 ГВт до 40 ГВт. Эффективность передачи энергии в нагрузку составляет более 70 %.

Таблица 5.1 – Параметры модуля из шести ЛТД ступеней при использовании цилиндрического диода с соотношением диаметров электродов 200 мм / 168 мм

Зарядное напряжение, кВ	Ток нагрузки, кА	Фронт тока, нс	Напряжение на нагрузке, кВ	Мощность, ГВт	Энергия в нагрузке, кДж
70	84	130	250	19	3.35
80	96	125	300	27	4.55
90	103	120	340	33	5.8
98	112	115	375	40	6.8

Для испытания вакуумных элементов генератора сопротивление цилиндрического диода было увеличено в 2.8 раза до  $\approx 10$  Ом за счет уменьшения диаметра центрального проводника в диоде до 129 мм. В результате напряжение на диоде возросло до 440 кВ (рисунок 5.12). Напряжение на вакуумных изоляторах ЛТД ступеней превысило 70 кВ, что соответствует средней напряженности электрического поля вдоль вакуумной поверхности проходных изоляторов ступеней более 46 кВ/см. Испытания показали отсутствие утечек тока вдоль изоляторов и поперек коаксиальной линии.

Экспериментальные данные для диода с отношением диаметров электродов 200 мм / 129 мм, полученные при изменении зарядного напряжения ступеней модуля в диапазоне 70–100 кВ в момент времени установления магнитной самоизоляции, помещены на расчетную зависимость рисунка 5.7. Эти данные также свидетельствуют о допустимости использования подхода, основанного на предположении о предельном токе магнитной самоизоляции.

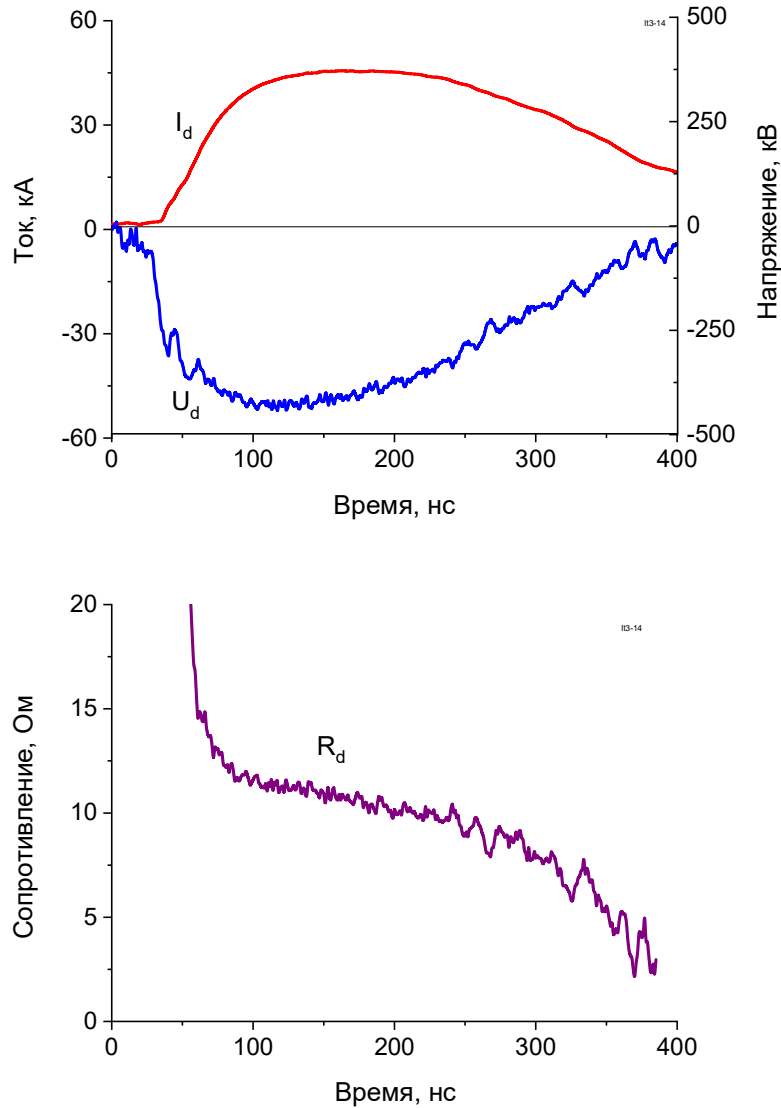


Рисунок 5.12 – Осциллограммы разряда ЛТД модуля на цилиндрический диод с отношением диаметров электродов 200 мм/129 мм:  $I_d$  – тока в диоде,  $U_d$  – напряжения на диоде,  $R_d$  – сопротивление диода. Зарядное напряжение 90 кВ

За весь период эксплуатации модуля было выполнено более  $5 \cdot 10^3$  включений. Продемонстрирована его надежная работа в воздухе атмосферного давления при зарядном напряжении до 100 кВ.

#### 5.4 Параметры генератора в составе двух модулей из двенадцати ЛТД ступеней и лазерного усилителя на его основе

На основе результатов испытания модуля в составе шести ЛТД ступеней созданы два модуля из двенадцати ЛТД ступеней и генератор на их основе. Блок-схема

единичного модуля генератора аналогична представленной на рисунке 5.5. Различие состоит в двукратно увеличенном числе последовательно включенных ЛТД ступеней.

Параметры генератора при зарядном напряжении ЛТД ступеней 85, 90 и 95 кВ обобщены в таблице 5.2. При зарядном напряжении ЛТД ступеней 95 кВ генератор обеспечивает ускоряющее напряжение до 600 кВ и ток в вакуумном диоде около 230 кА при длительности импульса 250 нс на полувысоте амплитуды (рисунок 5.13). В диод выводится энергия за характерное время 200 нс с пиковой мощностью 130 ГВт. Энергия в пучке при уровне мощности не менее половины от максимальной составляет около 20 кДж из запасаемых в секциях ЛТД ступеней 34.6 кДж. В газовую камеру через фольгу вводится энергия 7–9 кДж.

Таблица 5.2 – Параметры генератора в составе двух модулей из двенадцати ЛТД ступеней

Зарядное напряжение, кВ	Запасаемая энергия, кДж	Ток диода, кА	Напряжение на диоде, кВ	Мощность, ГВт	Энергия в диоде, кДж	Отношение энергии диода к запасенной, %
85	27.8	195	520	90	18	65
90	31.1	215	560	110	23	74
95	34.6	230	600	125	26	75

При инжекции в газовую камеру электронный пучок поглощается ксеноном и его энергия преобразуется в ВУФ излучение эксимерных молекул ксенона. Внутри газовой камеры вдоль оси расположена шестигранная лазерная кювета, содержащая смесь паров ХеF<sub>2</sub> и азота. ВУФ излучение попадает в лазерную кювету через 54 окна из СаF<sub>2</sub>. Под действием ВУФ излучения на длине волны  $\approx 170$  нм осуществляется оптическая накачка лазерной смеси. С торцов кювета закрыта окнами из плавленого кварца диаметром 30 см. Для усиления фемтосекундного лазерного излучения используется многопроходная оптическая система (33 прохода по активной среде), состоящая из 32 круглых зеркал постепенно увеличивающегося диаметра, расположенных по периметру внутренних фланцев лазерной кюветы. После отражения от последнего зеркала пучок распространяется по оси кюветы и выводится наружу [151]. На выходе лазерной системы достигнута мощность фемтосекундного излучения видимого диапазона спектра 40 ТВт [152].

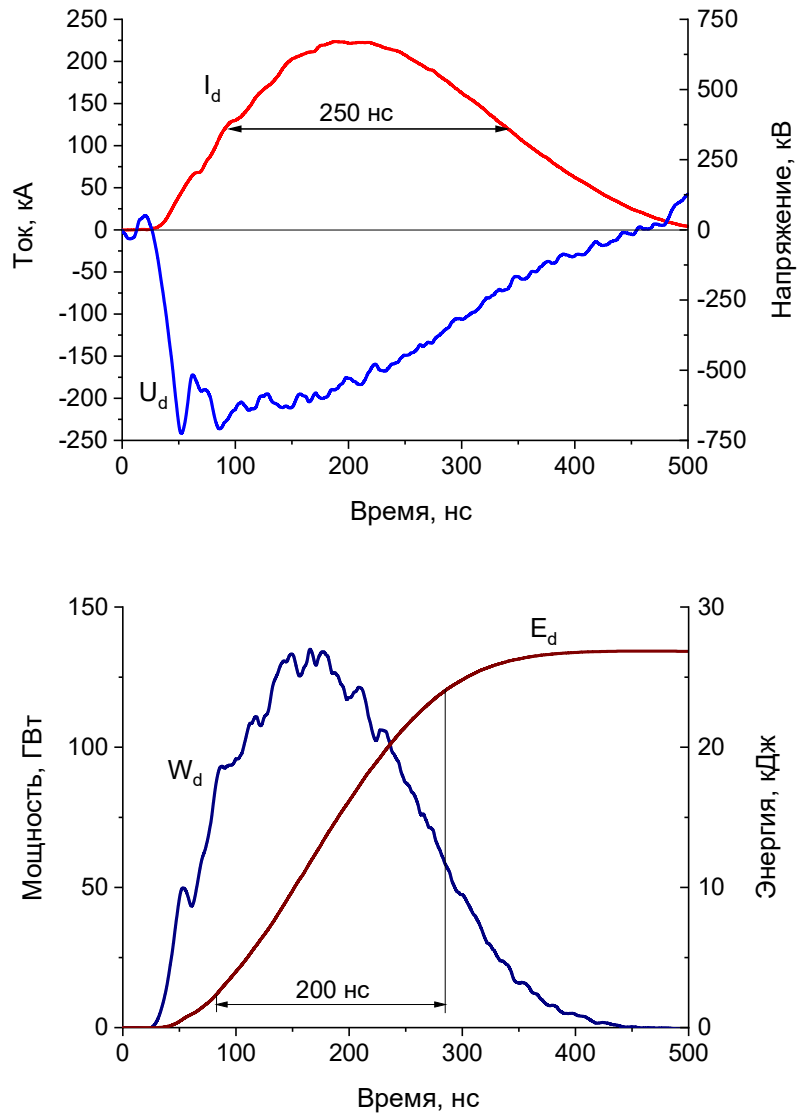


Рисунок 5.13 – Осциллограммы тока разряда генератора в составе двух модулей из двенадцати ЛТД ступеней на электронный диод  $I_d$ , напряжения на диоде  $U_d$ , мощности  $W_d$  и энергии  $E_d$ , выведенной в диоде, при зарядном напряжении ЛТД ступеней 95 кВ

## 5.5 Сравнение ЛТД генератора ТНЛ-100 с ранее созданным генератором для лазерной системы

Подход, заключающийся в прямой накачке лазера от мощных импульсных генераторов по схеме ЛТД без формирующих линий в составе ускорителя, был предложен и впервые реализован в ИСЭ СО РАН [87, 88]. Дальнейший прогресс в развитии ускорителей для эксимерных лазеров связан с уменьшением длительности формируемого импульса. С одной стороны, снижение длительности импульса позволяет упростить задачу получения широкоапертурного электронного пучка, снизить вероятность пробоя элементов ускорителя и диода. С другой стороны, это позволяет при том же уровне



запасаемой энергии увеличить выходную мощность, либо реализовать ту же мощность при меньшем уровне запасаемой энергии.

Для иллюстрации сказанного сравним генератор на основе двух модулей из двенадцати ЛТД ступеней для лазерной системы ТНЛ-100 с ранее созданным генератором на основе субмикросекундных ЛТД ступеней (см. подраздел 1.3) [87, 88]. Оба генератора предназначены для накачки лазера с объемом газовой активной среды около 200 литров. Сравнение демонстрирует прогресс в снижении длительности на полувысоте генерируемого импульса на диоде с 700 нс до 250 нс. Уменьшение длительности позволило сохранить пиковую мощность электронного пучка на уровне свыше 100 ГВт при снижении запасаемой в емкостном накопителе энергии в 2.8 раза.

## 5.6 Выводы

Экспериментально продемонстрирована возможность создания ЛТД генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления для мощных электронных ускорителей с характерным временем вывода энергии из первичного емкостного накопителя в вакуумный диод около 200 нс.

Создан импульсный генератор в составе двух модулей, каждый из которых включает двенадцать ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления. При зарядном напряжении ЛТД ступеней 95 кВ генератор обеспечивает ускоряющее напряжение до 600 кВ и ток в диоде около 230 кА при длительности импульса 250 нс на полувысоте амплитуды. Пиковая мощность в диоде достигает 130 ГВт. Энергия в пучке при уровне мощности не менее половины от максимальной составляет около 20 кДж из запасаемых в емкостном накопителе 34.6 кДж.

Генератор позволил создать в ИСЭ СО РАН уникальную лазерную систему ТНЛ-100, формирующую импульсы фемтосекундного излучения видимого диапазона спектра рекордной мощности.

Создание генератора демонстрирует прогресс в снижении длительности на полувысоте генерируемого импульса на диоде с 700 нс до 250 нс, что позволило сохранить пиковую мощность электронного пучка на уровне 100 ГВт при снижении запасаемой в емкостном накопителе энергии в 2.8 раза по сравнению с ранее созданным генератором для прямой накачки газового лазера без формирующих линий.

## 6 Модуль мультимегаамперной ЛТД установки

### 6.1 ЛТД ступень модуля

#### 6.1.1 Конструкция ЛТД ступени

В конструкцию ступени заложены решения, апробированные в ступенях, описанных в работах [114, 142, 143, 153, 154] и разделах 4, 5. В ступени отсутствует сплошной герметичный корпус, а в качестве изоляции используется воздух атмосферного давления, что позволяет производить обслуживание и ремонт элементов ступени без ее полной разборки, а при работе ступени в составе модуля – и без разборки модуля.

Конструкция ступени показана на рисунке 6.1, а ее фотография приведена на рисунке 6.2. ЛТД ступень содержит емкостной накопитель энергии из 24-х секций 160 нФ, включенных параллельно. Секции разбиты на четыре идентичных сегмента по шесть секций в каждом. При зарядном напряжении 100 кВ запасаемая энергия в емкостном накопителе ступени составляет 19.2 кДж.

Четыре сегмента (1) расположены по сторонам опорной плиты (2) и прикреплены к плите низковольтной стороной с помощью болтовых соединений. Высоковольтные выводы сегментов соединяются со сборными электродами ступени с помощью пружинных контактов. Отсоединив болтовое соединение между основаниями сегмента и ступени, можно извлечь сегмент для ревизии.

В центральной части ступени расположен ферромагнитный сердечник (3), набранный из нескольких колец. Кольца сердечника монтируются на опорном стальном кольце (4), к которому крепятся сборные электроды ступени (5). Стальное кольцо является внешним электродом выходной коаксиальной линии ЛТД ступени. Кольца сердечника ступени намотаны лентой из электротехнической стали ЭТ-3425 толщиной  $\delta=0.05$  мм и шириной  $h=18$  мм. Витки изолированы пленкой из лавсана толщиной 0.01 мм. Размеры кольца по стали:  $OD \times ID \times h = 1568 \text{ мм} \times 1388 \text{ мм} \times 18 \text{ мм}$ , где  $OD$  – внешний диаметр,  $ID$  – внутренний диаметр,  $h$  – высота. Длина средней магнитной линии  $\ell_i = 0.5 \cdot \pi \cdot (OD + ID) = 4643 \text{ мм} \approx 4.6 \text{ м}$ . Сечение стали в каждом кольце, с учетом коэффициента заполнения  $k \approx 0.8$ , равно  $\approx 13 \text{ см}^2$ , что для сердечника из пяти колец дает сечение  $S_i \approx 65 \text{ см}^2$ .

Сегменты ступени изолированы от опорной плиты изоляторами (6) из оргстекла толщиной 15 мм. Проходной изолятор между объемами ступени (7) и выходной линией также имеет толщину 15 мм. На внешних стенках ступени размещены разъемы для зарядных кабелей, пусковых кабелей, кабеля подмагничивания, а также газовой магистрали, обеспечивающей подачу и сброс сухого воздуха в разрядниках. С двух противоположенных сторон ступени на высоковольтных вводах зарядного напряжения (9) устанавливаются зарядные резисторы (8).

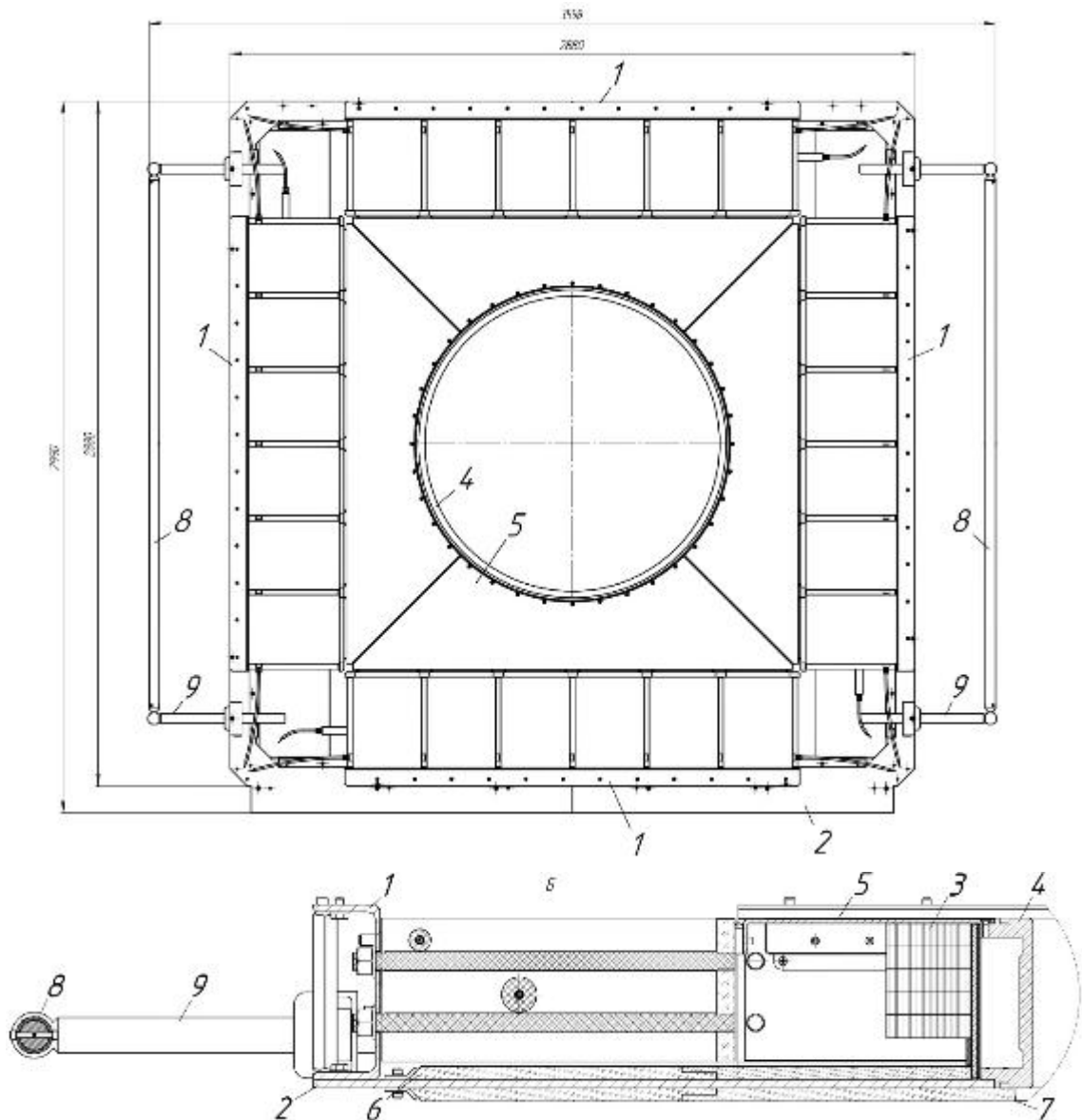


Рисунок 6.1 – ЛТД ступень без верхней плиты

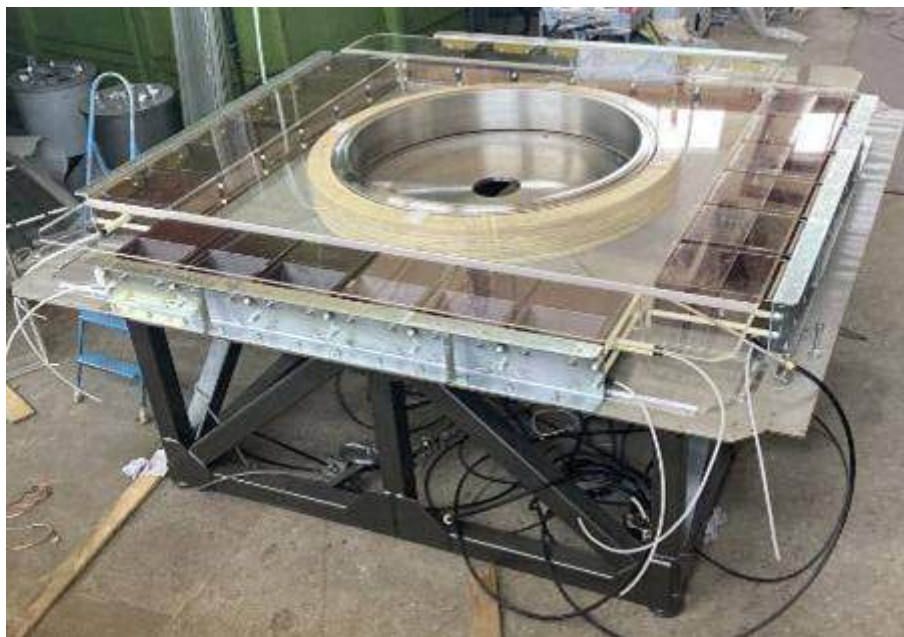


Рисунок 6.2 – Фотографии ЛТД ступени без верхней плиты в процессе монтажа в горизонтальном положении

Габаритные размеры ступени с зарядными резисторами 2990 мм × 3558 мм × 210 мм, вес ступени около 2.5 т.

Конструкция и фотография сегмента ЛТД ступени приведены на рисунках 6.3 и 6.4. Шесть секций 160 нФ (1) размещены на основании (2) из стального швеллера и прижаты к нему диэлектрической плитой (3) с помощью капролоновых шпилек (4). Между секциями (1) и диэлектрической плитой (3) пропущены фольговые контакты (5), подсоединяющие выходы конденсаторов секций к сборному электроду ступени. Крайняя секция в сегменте имеет проходной изолятор, через который зарядное напряжение подводится к конденсаторам секции. Между секциями установлены проволочные резисторы с сопротивлением  $\approx 170$  Ом, позволяющие, во-первых, передавать зарядное напряжение из секции в секцию, во-вторых, ограничить ток при самопроизвольном срабатывании одной из секций в сегменте. Пусковое напряжение подается с обеих сторон сегмента для уменьшения разности во времени прихода запускающего импульса между отдельными секциями. Для этого используется высоковольтный провод в полиэтиленовой изоляции, пропущенный последовательно через пусковые электроды разрядников всех шести секций.

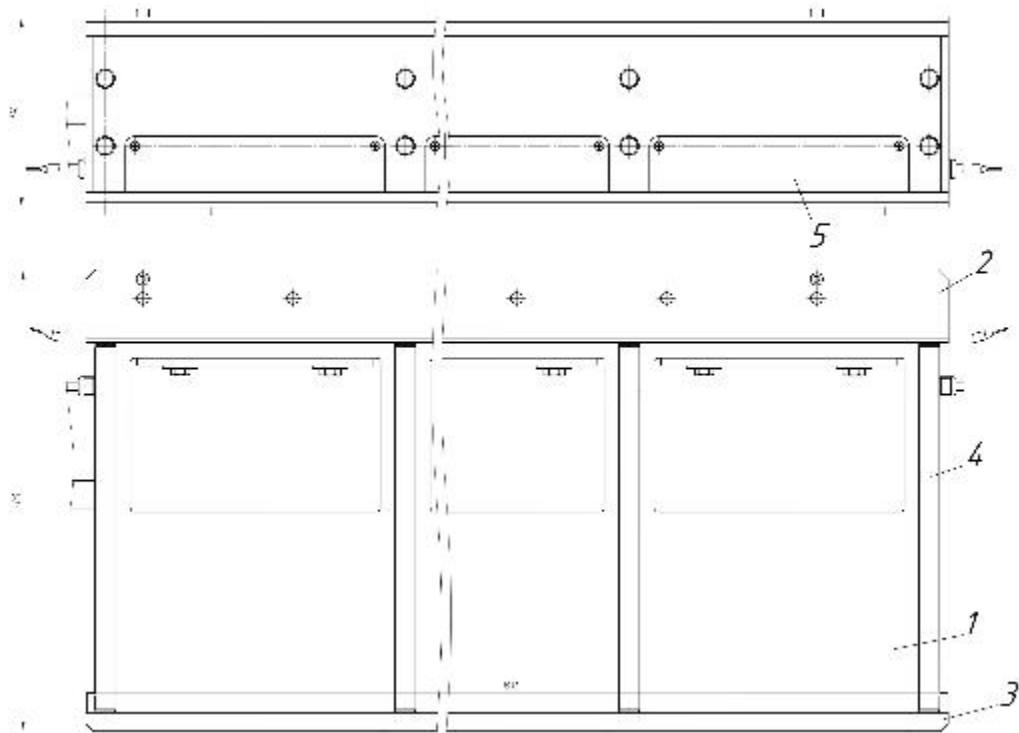


Рисунок 6.3 – Конструкция сегмента ЛТД ступени

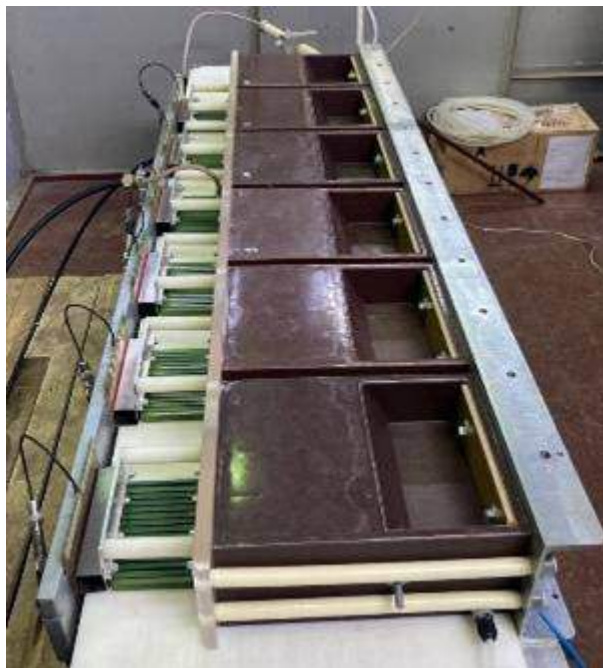


Рисунок 6.4 – Фотография сегмента, установленного в испытательном стенде

#### 6.1.2 Схема исследования параметров ЛТД ступени

Задачами исследований были:

- получение параметров выходного импульса в режиме разряда с предельно выходной мощностью;

- получение данных по стабильности срабатывания (джиттеру) и воспроизводимости выходного импульса;
- проверка работы сердечника;
- получение экспериментальных данных для электрической схемы замещения ступени для использования в проектировании ЛТД установки.

Программа исследования включала как работу с единичным сегментом, так и с ЛТД ступенью в целом. Схема исследования характеристик сегмента приведена на рисунке 6.5. Схема исследования характеристик ступени идентична представленной в подразделе 4.3 на рисунке 4.6. В качестве пускового генератора для запуска разрядников секций используется одна секция 80 нФ, заряжаемая от своего высоковольтного источника до напряжения 85 кВ и разряжаемая через длинный высоковольтный кабель. На выходе пускового генератора формируется импульс напряжения со средней скоростью нарастания по уровню 0.1-0.9 около 3 кВ/нс (рисунок 6.6). Система регистрации включала резистивные делители напряжения, индуктивные и резистивные токовые шунты (см. схемы на рисунках 4.6 и 6.5). Для регистрации сигналов использовались цифровые осциллографы Tektronix с полосой регистрации 500 МГц.

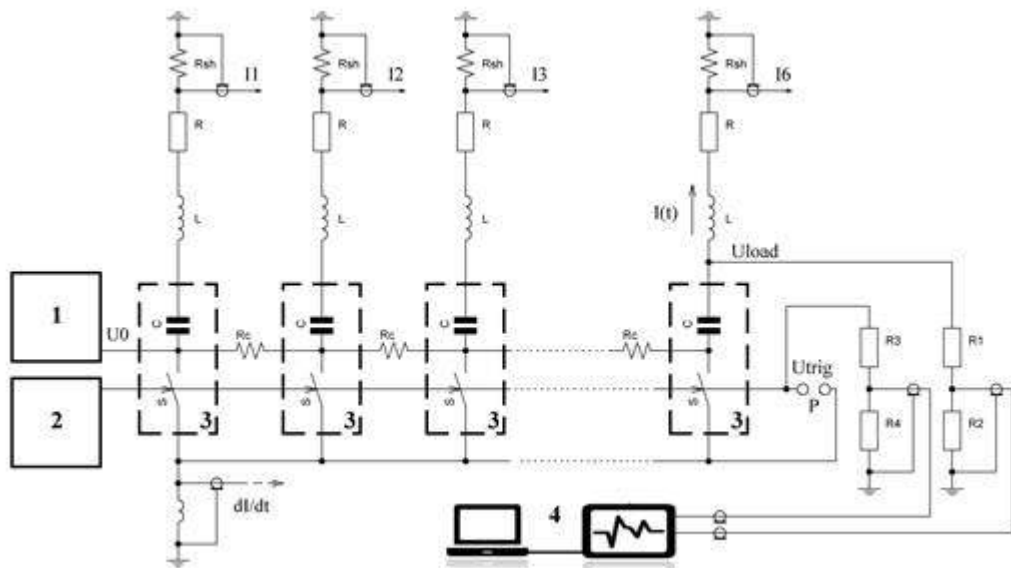


Рисунок 6.5 – Схема стенда для испытания сегментов ЛТД ступени:

1 – высоковольтный источник питания; 2 – генератор запускающих импульсов; 3 – секция; 4 – осциллограф;  $L-R$  – нагрузка. Регистрируются напряжение  $U_{load}$  на сборной шине нагрузки с помощью резистивного делителя  $R_1-R_2$ , пусковое напряжение  $U_{trig}$  с помощью резистивного делителя  $R_3-R_4$ , ток разряда каждой секции сегмента  $I_1-I_6$  с помощью резистивных шунтов  $R_{sh}$ , производная тока сегмента  $dI/dt$  с помощью индуктивного шунта

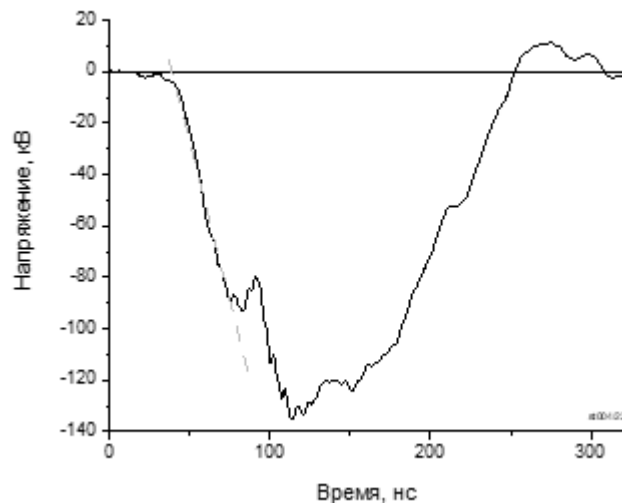


Рисунок 6.6 – Импульс пускового напряжения в испытаниях ЛТД ступени

### 6.1.3 Параметры сегмента

Эквивалентные электрические параметры сегмента обобщены в таблице 6.1. Параметры получены с использованием выражений 3.4 и 3.5 из осциллограммы производной тока разряда на короткозамкнутую нагрузку с собственной индуктивностью  $L \approx 3$  нГн.

Таблица 6.1 – Эквивалентные емкость  $C_S$ , индуктивность  $L_S$  и сопротивление  $R_S$  сегмента из шести секций 160 нФ

$C_S$ , нФ	$L_S$ , нГн	$R_S$ , Ом	$(L_S/C_S)^{1/2}$ , Ом	$(L_S \cdot C_S)^{1/2}$ , нс
960	13.5	0.012	0.12	114

На рисунке 6.7 приведены осциллограммы, иллюстрирующие разряд сегмента на резистивную нагрузку 0.167 Ом, когда на каждую секцию в сегменте приходится нагрузка около 1 Ом. Нагрузка изготавливалась из 180 параллельно включенных резисторов ТВО-10, 27 Ом. Резисторы разбиты на шесть сборок по 30 параллельных резисторов в каждой.

При зарядном напряжении 95 кВ амплитуда тока разряда достигает 300 кА, фронт импульса по уровню (0.1–0.9) от амплитудного значения составляет 100 нс. В секциях сегмента запасается энергия  $\approx 4.3$  кДж. В нагрузке выводится  $\approx 3.5$  кДж энергии с пиковой мощностью  $\approx 15$  ГВт. Время вывода энергии между уровнями 0.1–0.9 от амплитудного значения составляет около 235 нс.

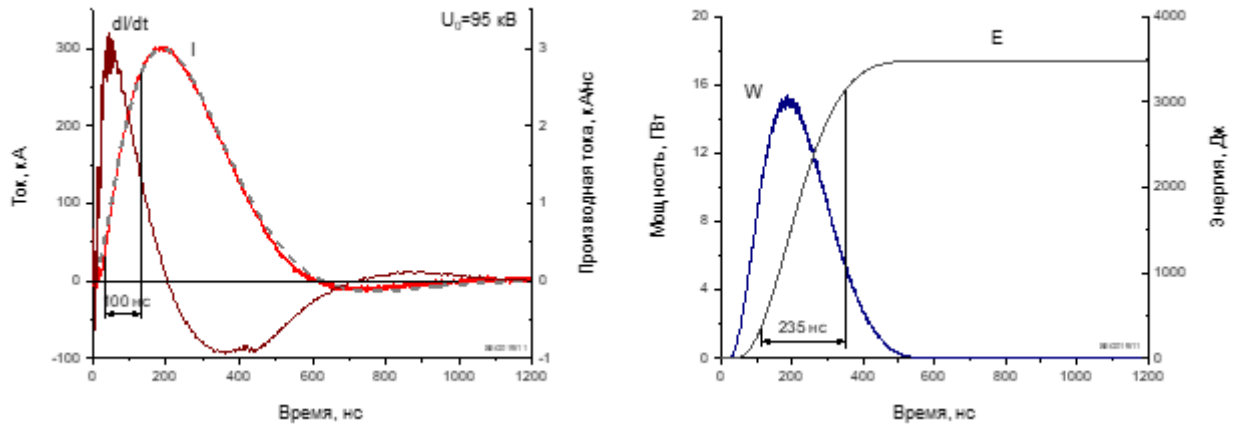


Рисунок 6.7 – Экспериментальные (сплошные линии) и расчетная (пунктирная линия) осциллограммы разряда сегмента на нагрузку  $0.167$  Ом при зарядном напряжении  $95$  кВ:  $I$  – ток нагрузки;  $di/dt$  – производная тока нагрузки;  $W$ ,  $E$  – мощность и энергия в нагрузке

Сравнение с данными разряда единичной секции на нагрузку  $1.03$  Ом при зарядном напряжении  $95$  кВ (см. рисунок 3.10 и таблицу 3.4) демонстрирует шестикратное увеличение амплитуды тока разряда и пиковой мощности.

В испытаниях наработка каждого из четырех сегментов ступени составила более  $250$  импульсов. Основная часть импульсов выполнена при зарядном напряжении  $U_0 = 90$  кВ и  $95$  кВ. При этом среднеквадратичное отклонение времени задержки между импульсами пускового напряжения и напряжения нагрузки от среднего значения (джиттер)  $\sigma$  составило  $2$  нс, т.е. реализуется наносекундная точность включения сегмента. Среднеквадратичное отклонение амплитуды выходного импульса сегмента составляет менее  $1\%$  от среднего значения.

#### 6.1.4 Электрическая модель сегмента

Электрическая схема замещения сегмента (рисунок 6.8) представляет собой последовательно включенные емкость  $C_S$ , индуктивность  $L_S$ , постоянное сопротивление  $R_S$  и нелинейное сопротивление  $R_{SM}(t)$ , моделирующее переходную характеристику искровых разрядников секций сегмента. Параметры  $C_S$ ,  $L_S$  и  $R_S$ , полученные экспериментально, приведены в таблице 6.1. Для расчета эквивалентного переменного сопротивления разрядников секций  $R_{SM}(t)$  используется модель Брагинского (гидродинамическое расширение искрового канала в приближении постоянной проводимости). Процедура моделирования приведена в подразделе 3.5. Допущением



модели является зажигание всех искровых каналов в разрядниках и равномерное распределение тока между искровыми каналами. В выражении (3.17) для переходного сопротивления принимается число искровых каналов в разрядниках шести секций  $N=36$ .

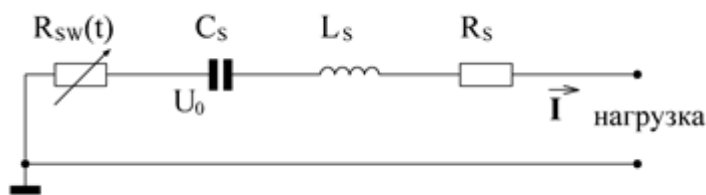


Рисунок 6.8 – Электрическая схема замещения сегмента ЛТД ступени:  $C_s=960$  нФ,  $L_s=13.5$  нГн,  $R_s=12$  мОм

В качестве примера моделирования переходного процесса в сегменте, на рисунке 6.7 совместно с экспериментальными осциллограммами приведена расчетная кривая тока разряда (пунктирная линия) на нагрузку  $L_{load}=3.2$  нГн,  $R_{load}=0.167$  Ом при зарядном напряжении  $U_0=95$  кВ. Удовлетворительное согласие результатов моделирования и эксперимента обосновывает использование схемы на рисунке 6.8 при составлении электрической модели ЛТД ступени.

## 6.1.5 Параметры ЛТД ступени

### 6.1.5.1 Резистивная нагрузка ЛТД ступени

Для испытания и исследования характеристик ЛТД ступени использовалась резистивная нагрузка на основе водного раствора  $KBr$ . Фотография нагрузки дана на рисунке 6.9. Нагрузка состоит из  $m=60$  параллельных резисторов, конструкция которых показана на рисунке 6.10, а. Каждый резистор представляет собой стеклопластиковую трубу с внутренним диаметром  $2\rho=38$  мм и длиной между концевыми электродами  $\ell=156$  мм, заполненную водно-солевым раствором. Резисторы размещаются на диаметре  $2R=1104$  мм внутри объема выходной линии ступени диаметром  $2q=1240$  мм. В испытаниях центральный объем ступени заполнялся элегазом с целью исключить утечки тока с элементов нагрузки и вдоль поверхности изолятора.



Рисунок 6.9 – Нагрузка для испытаний и исследования характеристик ЛТД ступени

На рисунке 6.10, б приведена схема размещения резисторов, на основе которой рассчитана индуктивность нагрузки [136]:

$$L_{load} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left[ \ln \frac{q}{R} + \frac{r^4}{(r^2 - q^2)^2} \cdot \ln \frac{r}{q} - \frac{1}{2} \frac{r^2}{r^2 - q^2} - \frac{1}{4} \left( 1 - \frac{1}{m} \right) + \frac{1}{m} \cdot \ln \frac{R}{m\rho} \right] \approx 3.4 \text{ нГн}, \quad (6.1)$$

где  $2q=1240$  мм,  $R=552$  мм,  $2\rho=38$  мм,  $\ell=156$  мм,  $m=60$ .

Сопротивление нагрузки  $R_{load}$  варьировалось за счет концентрации КВг в растворе и подбиралось из условия реализации максимальной мощности разряда ЛТД ступени.

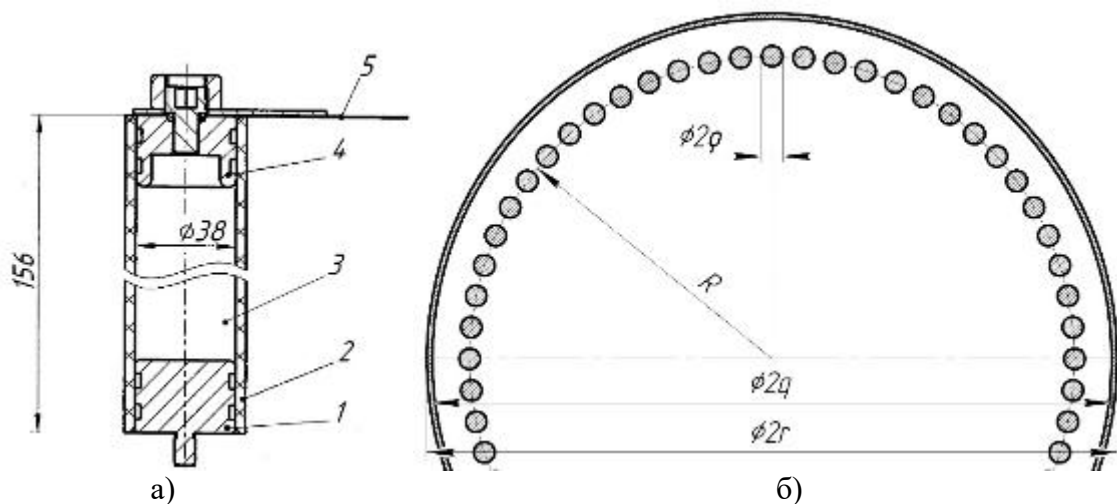


Рисунок 6.10 – Конструкция единичного резистора (а) и геометрия нагрузки (б) из 60 параллельных резисторов: 1, 4 – электроды резистора из нержавеющей стали; 2 – диэлектрический корпус резистора; 3 – объем под водно-солевой раствор; 5 – гибкий бронзовый контакт

### 6.1.5.2 Параметры индуктора ступени

В исследованиях ступени использовалась активная схема подмагничивания сердечника, когда ступень запускается в момент времени достижения током подмагничивания амплитудного значения. Импульс тока подмагничивания подавался на сборный электрод ступени (позиция 5 на рисунке 6.1) по высоковольтному кабелю КВИ-120. Импульс подмагничивания формировался генератором подмагничивания на основе емкостного накопителя из конденсаторов К75-816, 2.5 кВ, 60 мкФ (ЗАО «Элкод», г. Санкт-Петербург), коммутируемых тиристором ТБИ 373-1600-28. Амплитуда тока подмагничивания  $I_p$  варьировалась от 2.6 до 4.2 кА и, соответственно, максимальная напряженность магнитного поля подмагничивания изменялась в диапазоне  $I_p/\ell_t=0.56-0.91$  кА/м, где  $\ell_t \approx 4.6$  м – длина средней магнитной линии сердечника. Напряженность 0.6–0.9 кА/м соответствует индукции  $B \approx 1.7$  Тл на кривой намагничивания стали ЭТ3425 (см. таблицу 4.1).

Положим, что индукция насыщения электротехнической стали  $B_s$  около 1.8 Тл. Тогда при перемагничивании сердечника основным импульсом ступени перепад индукции составит  $\Delta B = B_s + B_p \approx 3.5$  Тл. Для сердечника из четырех колец оценочное значение вольт-секундного интеграла сердечника, соответствующее полному перемагничиванию, составляет  $VS = \Delta B \times S_t \approx 18$  мВ·с; а для сердечника из пяти колец  $VS = \Delta B \times S_t \approx 22$  мВ·с. Точное значение вольт-секундного интеграла сердечника определялось экспериментально при работе ступени с сердечником из четырех колец на резистивную нагрузку с сопротивлением 63 мОм в режиме, когда реализуется насыщение сердечника выходным импульсом ступени. Обзорные осциллограммы разряда ступени на нагрузку 63 мОм даны на рисунке 6.11. На рисунке 6.12 для этого режима показаны осциллограммы напряжения на индукторе, тока в цепи индуктора и его производной при амплитуде тока подмагничивания 2.6, 3.4 и 4.2 кА. По перегибу в осциллограммах тока в цепи индуктора  $I_i$  и его производной  $dI_i/dt$  можно определить момент насыщения сердечника. Значения вольт-секундного интеграла к этому моменту времени для трех режимов подмагничивания обобщены в таблице 6.2. Таблица также содержит величины вольт-секундного интеграла, соответствующего полному перемагничиванию, для сердечника из пяти колец. Эти данные получены путем пересчета экспериментальных

данных для сердечника из четырех колец с учетом увеличения площади поперечного сечения сердечника.

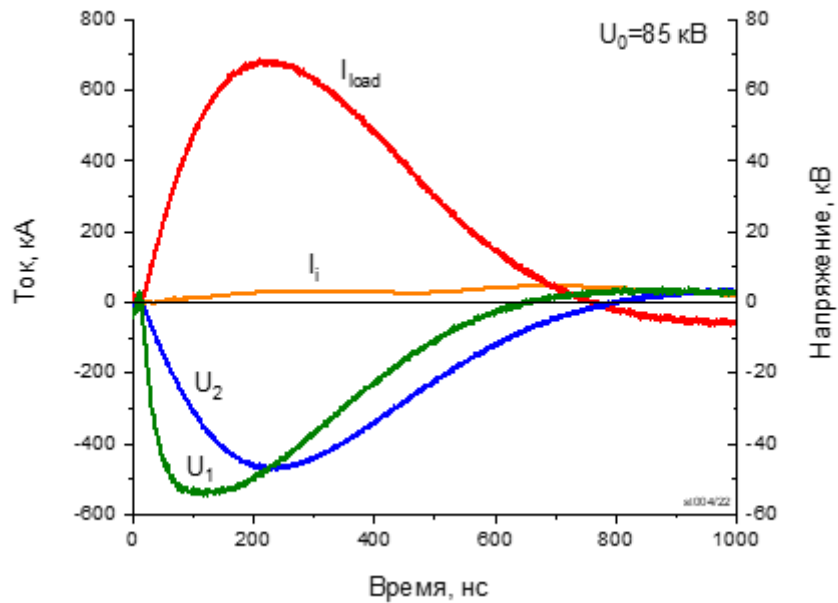


Рисунок 6.11 – Разряд ЛТД ступени с сердечником из четырех колец на нагрузку  $R_{load}=0.063$  Ом:  $I_{load}$  – ток нагрузки;  $I_i$  – ток в цепи индуктора;  $U_1$  – напряжение на сборном электроде ступени;  $U_2$  – напряжение на нагрузке. Зарядное напряжение ступени  $U_0=85$  кВ

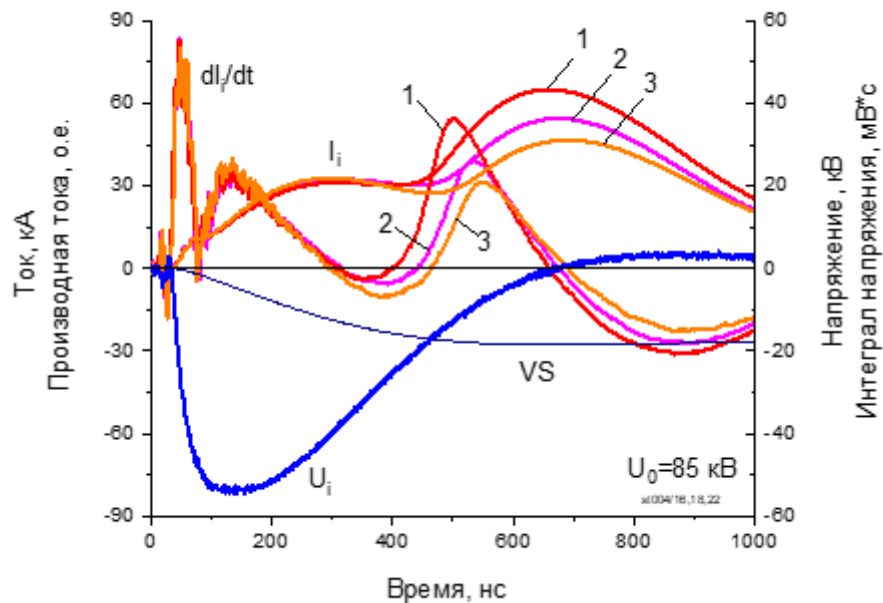


Рисунок 6.12 – Ток индуктора  $I_i$  с сердечником из четырех колец и его производная  $dl_i/dt$ , напряжение на индукторе  $U_i$  и его интеграл  $VS$ : 1 – режим подмагничивания током с амплитудой 2.6 кА, 2 – режим подмагничивания током с амплитудой 3.4 кА, 3 – режим подмагничивания током с амплитудой 4.2 кА

Таблица 6.2 – Значения вольт-секундного интеграла сердечника, соответствующего полному перемагничиванию, для трех режимов активного подмагничивания

Ток подмагничивания, кА	Экспериментальный вольт-секундный интеграл насыщения сердечника с четырьмя кольцами, мВ·с	Пересчет вольт-секундного интеграла для сердечника с пятью кольцами, мВ·с
2.6	14.4	18.0
3.4	15.3	19.1
4.2	15.6	19.5

В дальнейшем в сердечнике ЛТД ступени использовали пять колец. Такой сердечник позволяет работать при вольт-секундном интеграле до 20 мВ·с.

6.1.5.3 Параметры импульсов при разряде ЛТД ступени на резистивную нагрузку

Примеры осциллограмм и расчетных кривых разряда ЛТД ступени с зарядным напряжением  $U_0=95$  кВ на резистивные нагрузки с разным сопротивлением приведены на рисунках 6.13–6.15. Осциллограммы позволяют рассчитать сопротивление нагрузки:

$$R_{load}(t) = \frac{U_2(t) - L_3 \frac{dI}{dt}}{I_{load}(t)}, \quad (6.2)$$

где  $L_3=1.6$  нГн (см. подраздел 6.1.6.3).

Из расчетной кривой  $R_{load}(t)$ , приведенной также на рисунках, следует что сопротивление нагрузки в течение первой полувольты практически не изменяется, и для расчета мощности  $W$  и выведенной в нагрузку энергии  $E$  можно пользоваться постоянными значениями сопротивления:  $R_{load}=0.033, 0.039$  и  $0.045$  Ом для трех разных нагрузок, соответственно.

Параметры разряда для трех резистивных нагрузок при разных зарядных напряжениях ступени обобщены в таблице 6.3.

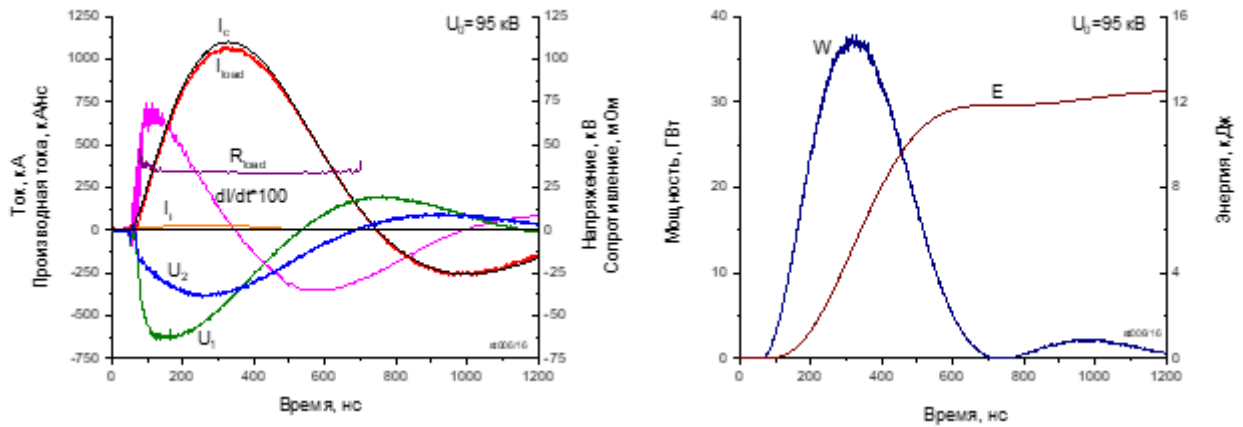


Рисунок 6.13 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда ЛТД ступени на нагрузку  $R_{load}=0.033$  Ом при зарядном напряжении  $U_0=95$  кВ

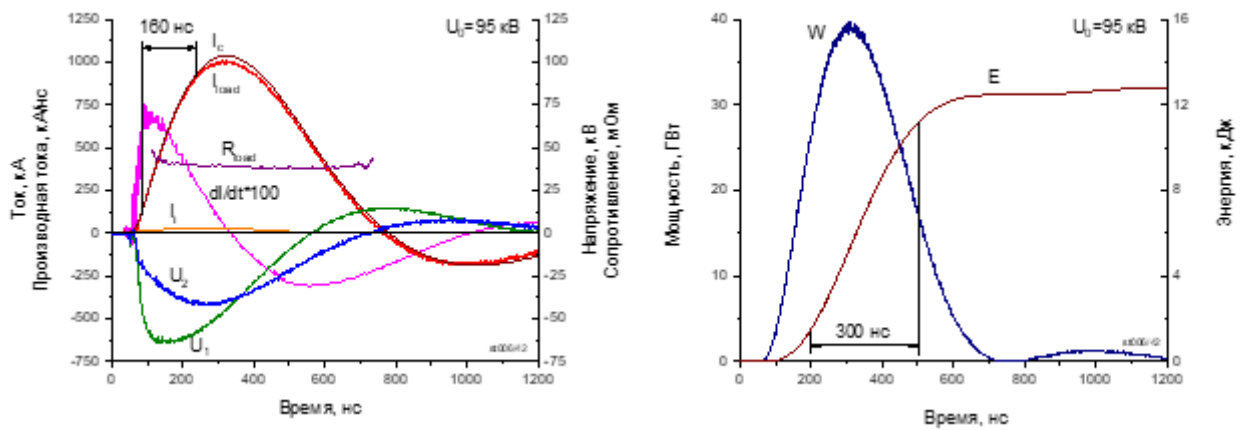


Рисунок 6.14 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда ЛТД ступени на нагрузку  $R_{load}=0.039$  Ом при зарядном напряжении  $U_0=95$  кВ

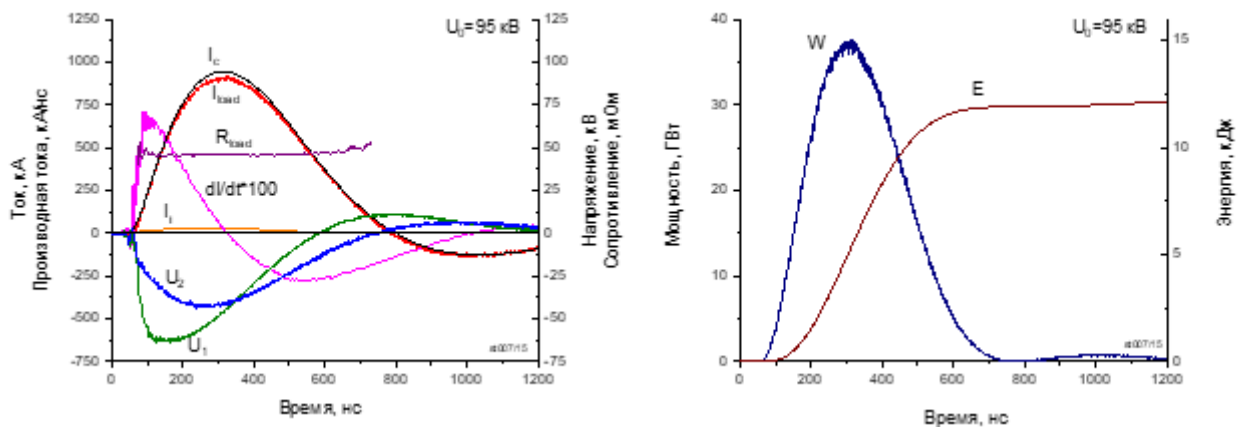


Рисунок 6.15 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда ЛТД ступени на нагрузку  $R_{load}=0.045$  Ом при зарядном напряжении  $U_0=95$  кВ

Таблица 6.3 – Результаты испытаний ЛТД ступени с резистивными нагрузками:  $U_0$  – зарядное напряжение ступени;  $U_{load}$ ,  $I_{load}$  – амплитуды напряжения и тока нагрузки;  $t_{1-9}$  – время нарастания импульса тока нагрузки по уровню (0.1-0.9);  $I_i$  – амплитуда тока в индукторе ступени;  $VS$  – вольт-секундный интеграл сердечника к концу первой полуволны импульса;  $W$  – пиковая выходная мощность ступени;  $E$  – энергия, выведенная в нагрузку в течение первой полуволны импульса;  $t_{E(1-9)}$  – время вывода энергии в нагрузку между уровнями (0.1-0.9) амплитудного значения первого полупериода

$U_0$ , кВ	$U_{load}$ , кВ	$I_{load}$ , кА	$t_{1-9}$ , нс	Реверс	$I_i$ , кА	$VS$ , мВ·с	$W$ , ГВт	$E$ , кДж	$t_{E(1-9)}$ , нс
$R_{load}=0.033 \text{ Ом}$									
80	31.2	880	170	23	24	15	25	8.25	320
85	33.6	940	170	23	26	15.9	29	9.3	320
90	36.0	1010	168	23	30	17.1	33.5	10.7	315
95	38.4	1070	168	23	32	18.2	37.5	11.9	315
$R_{load}=0.039 \text{ Ом}$									
80	34.4	820	160	17	24	15.9	26.5	8.6	320
85	37.2	890	160	17	27	17.1	31.0	9.9	320
90	39.2	940	160	18	30	18.0	34.5	11.1	315
95	41.6	1020	160	18	31	19.2	39.5	12.5	315
$R_{load}=0.045 \text{ Ом}$									
80	35.2	750	160	14	21	16.0	25.5	8.3	330
90	41.2	870	155	14	30	18.6	34.0	10.8	325
95	43.2	910	155	14	33	19.5	37.5	11.9	320

Максимальная мощность вывода энергии из емкостного накопителя энергии реализована в режиме разряда ЛТД ступени на нагрузку с сопротивлением  $\approx 0.04 \text{ Ом}$  (рисунок 6.15). В этом режиме разряда при  $U_0=95 \text{ кВ}$  реализуется импульс тока амплитудой 1 МА с фронтом по уровню 0.1–0.9 около 160 нс. При этом ток в цепи индуктора ступени составляет не более 3.5 % от тока в нагрузке. В нагрузку выводится более 70 % запасенной в емкостном накопителе энергии с пиковой мощностью  $\approx 40 \text{ ГВт}$  за характерное время  $\approx 300 \text{ нс}$ . За характерное время выбрана длительность между уровнями 0.1-0.9 от максимального значения.

#### 6.1.5.4 Нарботка ЛТД ступени

В испытаниях наработка ЛТД ступени составила более 400 импульсов. Основная часть импульсов выполнена с нагрузкой 0.039 Ом при зарядном напряжении  $U_0=90 \text{ кВ}$  и 95 кВ.

Наработка проводилась сериями по 10 импульсов с частотой 1 импульс в 30 секунд. После каждых 10 импульсов делался перерыв 30 минут. Через каждые 50 импульсов делался перерыв 2 часа, а в случае окончания рабочего дня перерыв составлял более 12 часов.

В серии из 200 импульсов при зарядном напряжении  $U_0=90$  кВ среднее время задержки между импульсами пускового напряжения и напряжения на нагрузке  $\langle t_d \rangle$  и среднеквадратичное отклонение от среднего значения (джиттер)  $\sigma$  составили:

$$\langle t_d \rangle \pm \sigma = 73 \pm 2 \text{ нс},$$

где время задержки определялось между уровнями 10 % от амплитудного значения импульсов. Средняя амплитуда напряжения на нагрузке  $\langle U_{load} \rangle$  и среднеквадратичное отклонение амплитуды от среднего значения  $\sigma$  составили:

$$\langle U_{load} \rangle \pm \sigma = 37.2 \pm 0.9 \text{ кВ}.$$

В серии из 200 импульсов при зарядном напряжении  $U_0=95$  кВ:

$$\langle t_d \rangle \pm \sigma = 69 \pm 2 \text{ нс};$$

$$\langle U_{load} \rangle \pm \sigma = 39.1 \pm 0.9 \text{ кВ}.$$

В ЛТД ступени реализуется наносекундная точность включения с джиттером 2 нс.

Среднеквадратичное отклонение амплитуды выходного импульса ЛТД ступени в экспериментах составило 2.4 % от среднего значения. Такой разброс в амплитуде импульса главным образом обусловлен поведением сопротивления жидкостной нагрузки, которое снижается в течение серии импульсов из-за нагрева. На рисунке 6.16 приведены величины сопротивления нагрузки в максимуме импульса для 150 последовательных импульсов при зарядном напряжении ступени 95 кВ. Видно, что в течение серии из 50 импульсов сопротивление снижается с 42 мОм до 38 мОм. За двухчасовой перерыв нагрузка частично остывает и ее сопротивление частично восстанавливается. В течение последующих 50 импульсов сопротивление снижается уже до 36 мОм. После длительного перерыва и полного остывания сопротивление нагрузки полностью восстанавливается перед следующей серией из 50 импульсов. Среднее значение сопротивления нагрузки в трех сериях по 50 импульсов составляет 38.6 мОм, среднеквадратичное отклонение от среднего значения 1.4 мОм или 3.5 % от среднего значения.



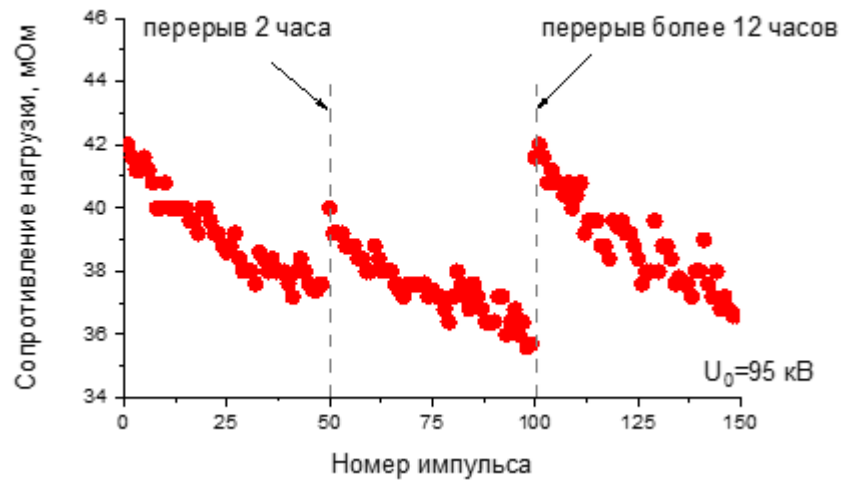


Рисунок 6.16 – Сопротивление жидкостной нагрузки в серии последовательных импульсов при зарядном напряжении ступени 95 кВ

## 6.1.6 Электрическая модель ЛТД ступени

### 6.1.6.1 Схема замещения ЛТД ступени

Электрическая схема замещения ЛТД ступени показана на рисунке 6.17.

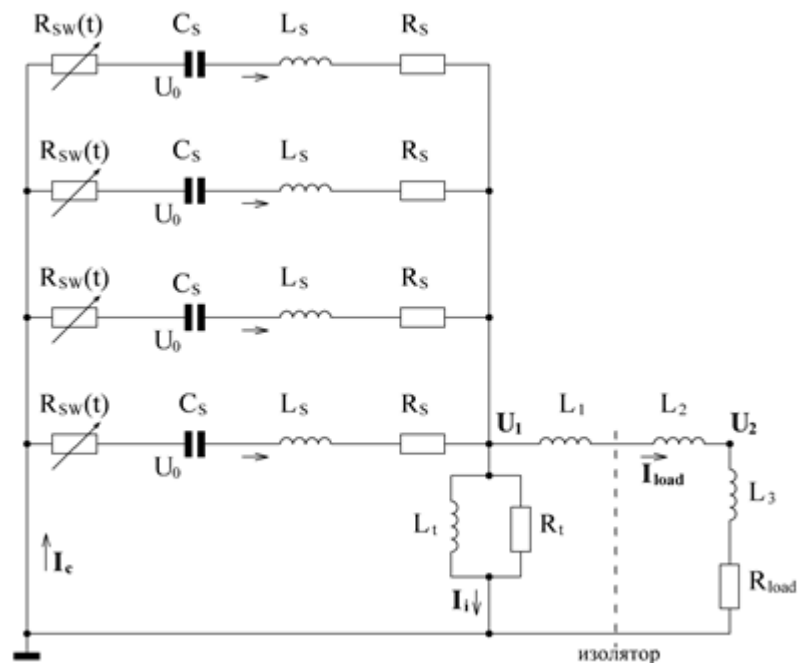


Рисунок 6.17 – Принципиальная электрическая схема замещения ЛТД ступени

Использованы следующие обозначения:

$C_S, L_S, R_S$  и  $R_{SH}(t)$  – элементы, замещающие сегменты ступени (см. подраздел 6.1.4);

$L_t$  и  $R_t$  – элементы, замещающие индуктор ступени;

$L_1$  – эквивалентная индуктивность передающей линии между сегментами и внешним проводником выходной линии ступени (позиция 5 на рисунке 6.1);

$L_2, L_3$  – индуктивности нагрузки до и после точки подключения делителя напряжения  $U_2$ , соответственно;

$R_{load}$  – сопротивление нагрузки.

На схеме также обозначены токи  $I_c, I_i, I_{load}$  и напряжения  $U_1, U_2$ , регистрируемые в экспериментах.

### 6.1.6.2 Эквивалентные параметры индуктора

Модель индуктора с ферромагнитным сердечником приведена в подразделе 4.7. Для определения параметров  $L_t$  и  $R_t$  схемы замещения индуктора воспользуемся результатами измерений напряжения и тока индуктора при разряде ступени на нагрузку 0.063 Ом, когда вольт-секундный интеграл сердечника достигает к концу импульса 20 мВ·с, т.е. реализуется полное перемагничивание сердечника (рисунок 6.18). В этом режиме ток в индукторе  $I_i$  достигает 26 кА за время  $t_i \approx 260$  нс после начала импульса.

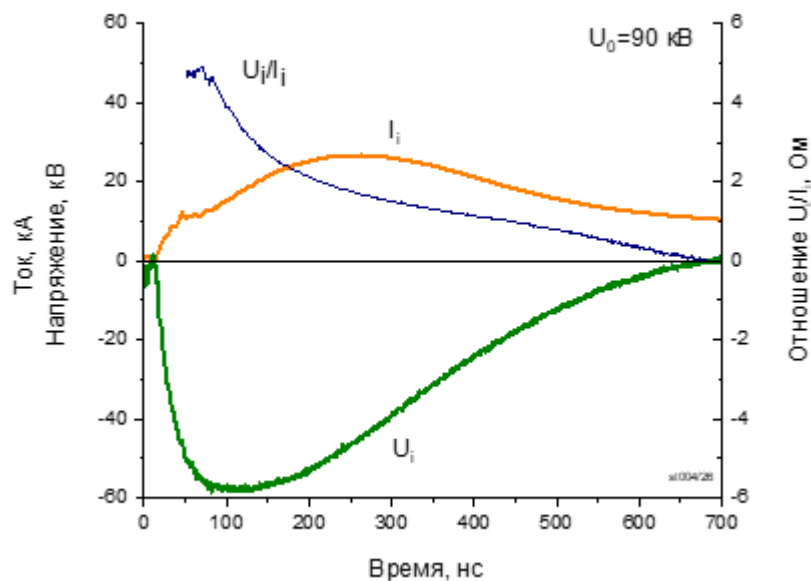


Рисунок 6.18 – Осциллограммы тока индуктора  $I_i$ , напряжения индуктора  $U_i$  и расчетная кривая  $U_i/I_i$  при разряде ЛТД ступени на нагрузку 0.063 Ом. Зарядное напряжение 90 кВ

Индуктивность индуктора  $L_i$  определяется выражениями (4.3) и (4.4), где длина средней линии сердечника  $\ell_i=4.6$  м, а площадь поперечного сечения сердечника с учетом коэффициента заполнения  $S_i=6.5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Принимая длительность импульса  $\tau \approx 700$  нс с учетом удельного сопротивления электротехнической стали ЭТ3425  $\rho=5 \cdot 10^{-7}$  Ом·м и толщины стальной ленты  $\delta=50 \cdot 10^{-6}$  м, имеем среднюю относительную магнитную проницаемость сердечника в ненасыщенном состоянии  $\mu_1 \approx 1.3 \cdot 10^9 \times \tau \approx 900$ . Тогда из (4.3) имеем индуктивность объема с сердечниками в ненасыщенном состоянии  $L_i \approx 1.6$  мкГн.

Расчетная индуктивная составляющая тока в индукторе к моменту  $t_i$

$$I'_i = \frac{1}{L_i} \int_0^{t_i} U_i dt \approx 8 \text{ кА}, \quad (6.3)$$

что более чем в 3 раза меньше экспериментальной величины  $I_i=26$  кА. Следовательно, амплитуда тока в индукторе в основном определяется сопротивлением сердечника  $R_t$  вихревому току.

Вихревой ток определяется процессом проникновения электромагнитного поля в электротехническую сталь сердечника. Время нарастания импульса напряжения на индукторе соответствует угловой частоте  $\omega$  порядка  $10^7$  с<sup>-1</sup>. Поскольку  $\omega \gg \frac{8\rho}{\mu_0\mu_1\delta^2}$ , сопротивление сердечника будет уменьшаться в течение импульса по мере проникновения поля [144]. Однако для инженерных расчетов в схеме замещения индуктора мы используем эквивалентное постоянное сопротивление  $R_t \approx 2.2$  Ом, определяемое выражением (4.8). Значение  $R_t$  подтверждается и экспериментальными осциллограммами. Действительно, если до насыщения сердечников ток в индукторе определяется в основном активным сопротивлением, то потери энергии на перемагничивание есть

$$E(t_c) \approx \int_0^{t_c} (U_i \cdot I_i) dt \approx 410 \text{ Дж}, \quad (6.4)$$

где  $t_c$  – время до насыщения сердечников. Тогда эквивалентное сопротивление сердечника, обеспечивающее тот же уровень потерь в течение  $t_c$ :

$$R_i \approx \frac{\int_0^{t_c} U_i^2 \cdot dt}{E(t_c)} \quad (6.5)$$

составляет около 2 Ом.

### 6.1.6.3 Определение индуктивностей $L_1-L_3$

Расчитать значения индуктивностей  $L_1-L_3$  в эквивалентной схеме замещения ступени позволяют экспериментальные осциллограммы, представленные на рисунках 6.14–6.16.

Суммарная индуктивность  $L_1+L_2$  оценивается как:

$$L_1 + L_2 = \frac{U_1 - U_2}{di/dt} \approx 5.3 \text{ нГн.} \quad (6.6)$$

Индуктивность  $L_3$  может быть оценена в момент времени перехода тока  $I_{load}$  через ноль, т.е. когда активная составляющая в напряжении  $U_2$  отсутствует. Тогда:

$$L_3 = \frac{U_2}{di/dt} \approx 1.6 \text{ нГн.} \quad (6.7)$$

Индуктивность объема внутри цилиндрического проводника  $L_2+L_3=L_{load} \approx 3.4$  нГн оценена из геометрических размеров нагрузки (см. подраздел 6.15.1). Тогда с учетом (6.7) имеем  $L_2=L_{load} - L_3 \approx 1.8$  нГн. Из (6.6) имеем индуктивность сборного электрода  $L_1 \approx 3.5$  нГн.

### 6.1.6.4 Моделирование разряда ступени

Параметры схемы замещения ЛТД ступени на рисунке 6.17 обобщены в таблице 6.4. С использованием этих параметров выполнено моделирование разряда ступени в программе Micro-Cap 12 [138]. Результаты моделирования включения ступени на нагрузки 0.033 Ом, 0.039 Ом и 0.045 Ом при зарядном напряжении  $U_0=95$  кВ приведены на рисунках 6.19–6.21. Для сравнения на рисунках показаны и экспериментальные осциллограммы в аналогичных условиях. Получено, что модель ступени позволяет удовлетворительно моделировать включение ступени и рассчитывать выходной ток, по крайней мере, в течение первой полуволны с погрешностью не более 4 %. Видимое отличие расчета от эксперимента наблюдается в форме тока индуктора, что связано с допущением о постоянном сопротивлении сердечника вихревому току. Но поскольку ток индуктора составляет лишь единицы процентов от полного тока, это не оказывает значимого влияния на расчет выходного тока ЛТД ступени. Удовлетворительное согласие результатов моделирования и эксперимента обосновывает использование представленной модели ЛТД ступени при проектировании ЛТД установок.

Таблица 6.4 – Параметры схемы замещения ЛТД ступени

$C_S$ , нФ	$L_S$ , нГн	$R_S$ , Ом	$L_1$ , нГн	$L_2$ , нГн	$L_3$ , нГн	$L_t$ , нГн	$R_t$ , Ом
960	13.5	0.012	3.5	1.8	1.6	1600	2.2

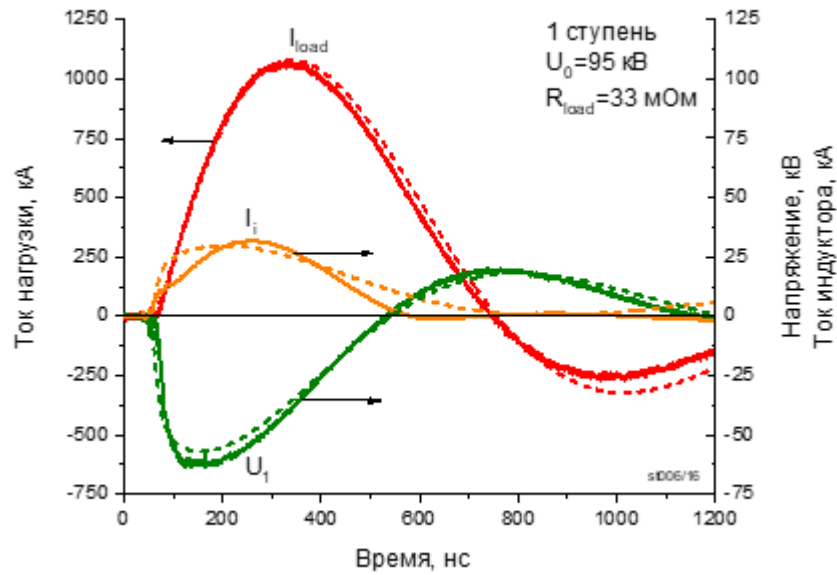


Рисунок 6.19 – Экспериментальные (сплошные) и расчетные (пунктирные) кривые тока нагрузки  $I_{load}$ , тока в цепи индуктора  $I_i$  и напряжения на сборном электроде  $U_1$  при разряде ЛТД ступени на нагрузку  $R_{load} = 0.033$  Ом при  $U_0 = 95$  кВ

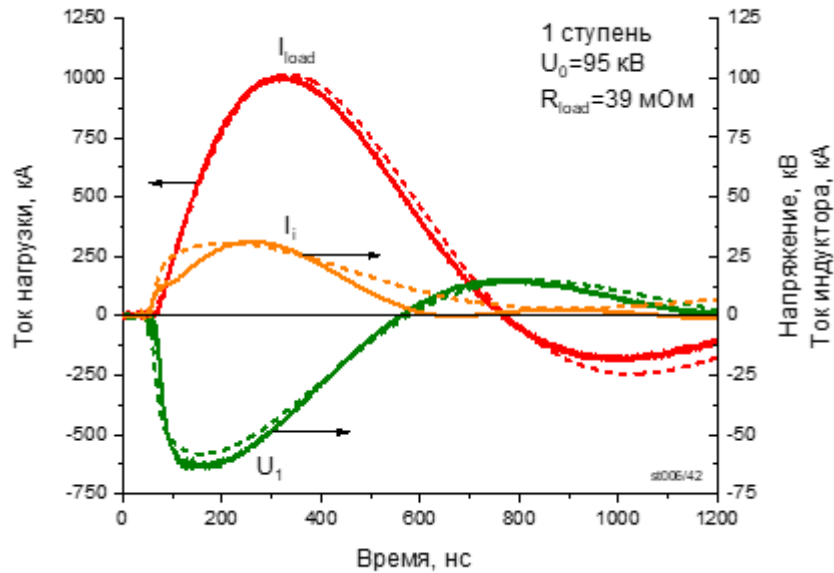


Рисунок 6.20 – Экспериментальные (сплошные) и расчетные (пунктирные) кривые тока нагрузки  $I_{load}$ , тока в цепи индуктора  $I_i$  и напряжения на сборном электроде  $U_1$  при разряде ЛТД ступени на нагрузку  $R_{load} = 0.039$  Ом при  $U_0 = 95$  кВ

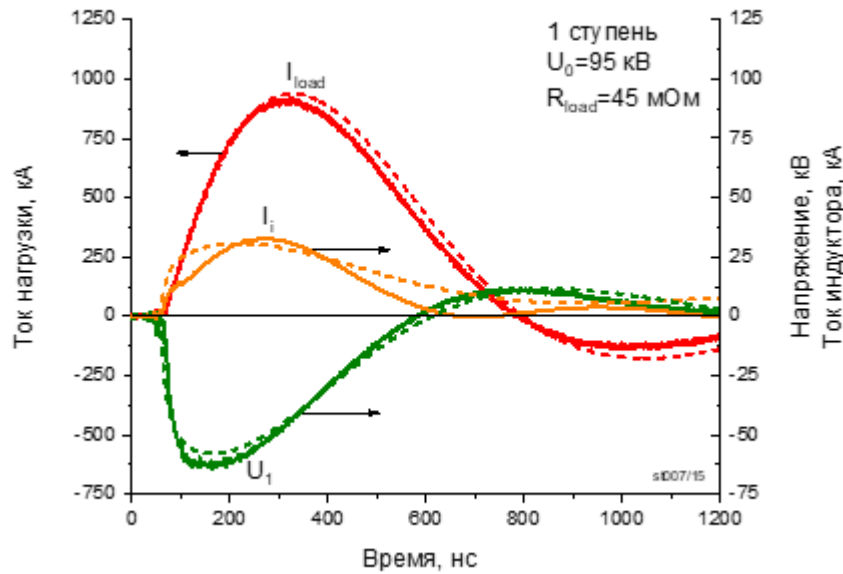


Рисунок 6.21 – Экспериментальные (сплошные) и расчетные (пунктирные) кривые тока нагрузки  $I_{load}$ , тока в цепи индуктора  $I_i$  и напряжения на сборном электроде  $U_1$  при разряде ЛТД ступени на нагрузку  $R_{load}=0.045$  Ом при  $U_0=95$  кВ

#### 6.1.6.5 Баланс энергии в ступени

Численный расчет схемы замещения позволяет составить баланс распределения энергии по элементам ЛТД ступени. Так, например, для режима разряда на нагрузку  $R_{load}=0.039$  Ом, в котором получена максимальная мощность, расчетный баланс энергии приведен в таблице 6.5. В этом режиме в течение первой полуволны в нагрузку выводится 76 % от запасаемой энергии в емкостном накопителе. Наибольшая часть потерь энергии в 10 % связана с коммутационной характеристикой разрядников секций. Потери энергии в сердечнике на перемагничивание составляют 2.5 %.

Таблица 6.5 – Оценочный баланс энергии к окончанию первой полуволны тока при разряде ЛТД ступени с зарядным напряжением  $U_0=95$  кВ на резистивную нагрузку  $R_{load}=0.039$  Ом

Запасаемая энергия	100 %
Энергия, переданная в нагрузку	76 %
Затраты энергии на коммутацию	10 %
Потери энергии на перемагничивание	2.5 %
Энергия, рассеянная в прочих элементах контура	6.5 %
Энергия в емкостном накопителе после перезарядки	5 %

## 6.2 Модуль в составе двух ЛТД ступеней

В модуле использованы технические решения, представленные в работах [144, 153–155] и разделах 4, 5.

### 6.2.1 Схема испытания и исследования модуля в составе двух ЛТД ступеней

Фотография модуля в составе двух ЛТД ступеней показана на рисунке 6.22. Схема исследования характеристик модуля аналогична схеме для единичной ступени (подраздел 4.3). Использовался следующий состав измерительных датчиков:

- резистивные делители для измерения напряжения  $U_1$  на выходе сегментов первой и второй ступеней;
- резистивный делитель для измерения напряжения на нагрузке  $U_2$ ;
- резистивный делитель для измерения пускового импульса напряжения  $U_{trig}$ ;
- индуктивный шунт для измерения производной тока  $dI/dt$  в сегменте ступени;
- резистивный шунт для измерения тока в нагрузке ступени  $I_{load}$ ;
- индуктивный шунт для измерения производной тока  $dI_i/dt$  в индукторе.

Для запуска модуля использовался тот же пусковой генератор, что и в экспериментах с одной ЛТД ступенью.



Рисунок 6.22 – Модуль в составе двух ЛТД ступеней в горизонтальном положении

### 6.2.2 Параметры импульсов при разряде модуля в составе двух ЛТД ступеней на резистивную нагрузку

В исследовании использовалась нагрузка, представленная в подразделе 6.1.5.1. Ее сопротивление было увеличено за счет концентрации КВт в водном растворе.

Осциллограммы разряда модуля в составе двух ступеней на нагрузки с сопротивлением  $R_{load} \approx 0.073$  Ом и 0.088 Ом показаны на рисунках 6.23 и 6.24. Параметры разряда модуля обобщены в таблице 6.6.

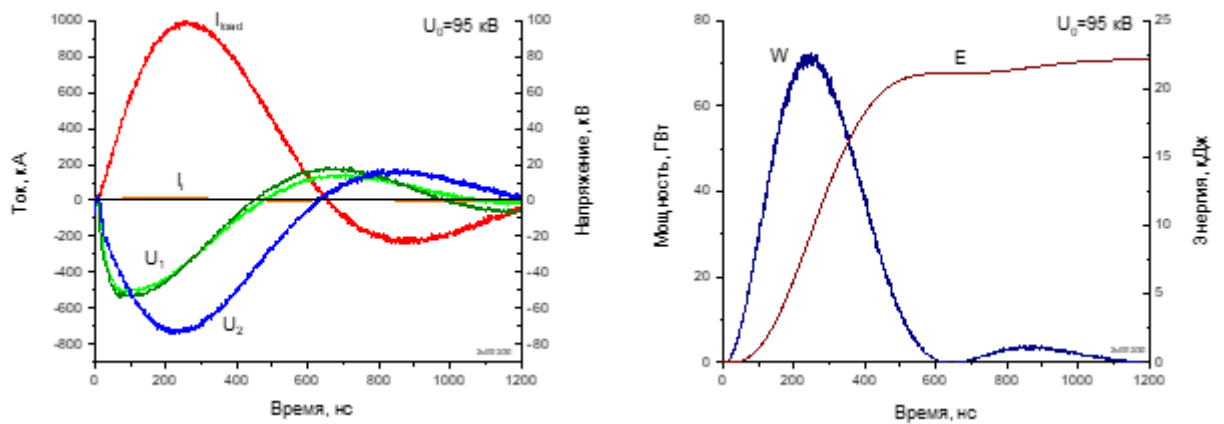


Рисунок 6.23 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда модуля из двух ЛТД ступеней на нагрузку  $R_{load} = 0.073$  Ом при зарядном напряжении  $U_0 = 95$  кВ

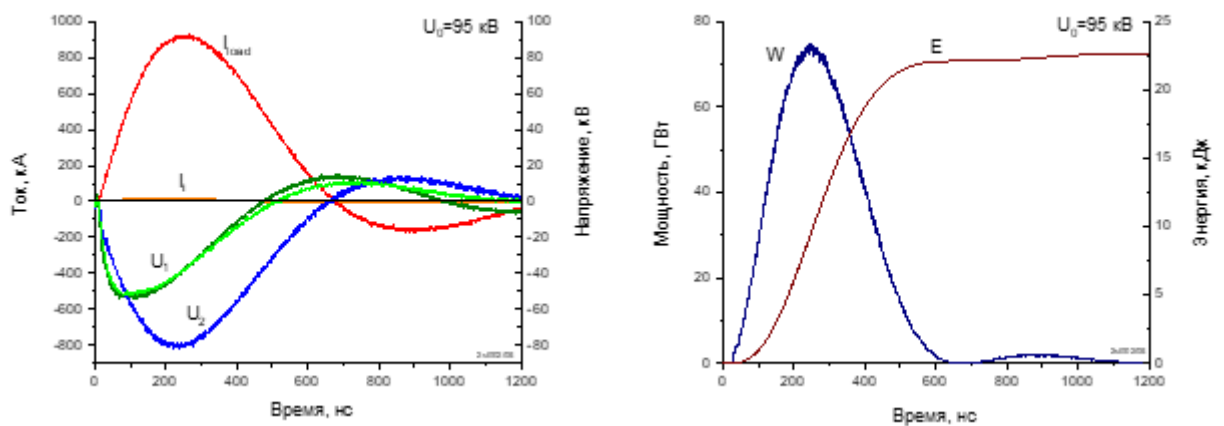


Рисунок 6.24 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда модуля из двух ЛТД ступеней на нагрузку  $R_{load} = 0.088$  Ом при зарядном напряжении  $U_0 = 95$  кВ



Таблица 6.6 – Результаты испытаний модуля из двух ЛТД ступеней на резистивные нагрузки:  $U_0$  – зарядное напряжение ступени;  $U_{load}$ ,  $I_{load}$  – амплитуды напряжения и тока нагрузки;  $t_{1-9}$  – время нарастания импульса тока нагрузки по уровню 0.1–0.9;  $W$ – пиковая выходная мощность ступени;  $E$ – энергия, выведенная в нагрузку;  $t_{E(1-9)}$  – время вывода энергии в нагрузку между уровнями 0.1–0.9 от максимального значения первого полупериода

$U_0$ , кВ	$U_{load}$ , кВ	$I_{load}$ , кА	$t_{1-9}$ , нс	Реверс	$W$ , ГВт	$E$ , кДж	$t_{E(1-9)}$ , нс
$R_{load}=0.073$ Ом							
80	60	825	162	22	49	14.9	305
85	65	885	162	22	57	17.4	303
90	68	915	155	22	62	18.3	290
95	73	990	155	22	71	21.1	277
$R_{load}=0.088$ Ом							
80	65	750	157	16	49	15.0	310
85	71	817	153	16	58	17.7	300
90	76	877	148	16	67	20.1	300
95	80	920	148	17	74	22.1	300

Экспериментальные данные демонстрируют, что последовательное включение двух ступеней и соответствующее двукратное увеличение сопротивления нагрузки по сравнению с сопротивлением для единичной ступени обеспечивает почти двукратное увеличение выходной мощности за счет увеличения выходного напряжения при сохранении тока разряда на уровне 1 МА. При этом длительность фронта импульса и характерное время вывода энергии из емкостного накопителя энергии в нагрузку не увеличились. Так при разряде модуля в составе двух ЛТД ступеней с зарядным напряжением 95 кВ на нагрузку с сопротивлением  $R_{load} \approx 0.088$  Ом реализуется пиковая мощность  $\approx 74$  ГВт при амплитуде тока и напряжения в нагрузке 0.92 МА и 80 кВ, соответственно. Фронт импульса тока по уровню 0.1–0.9 составляет  $\approx 150$  нс; время вывода энергии в нагрузку по уровню 0.1–0.9 от максимального значения составляет  $\approx 300$  нс.

### 6.2.3 Нарботка модуля из двух ЛТД ступеней

В испытаниях наработка модуля из двух ЛТД ступеней составила более 350 импульсов. Основная часть импульсов выполнена с нагрузкой 0.088 Ом при зарядном напряжении  $U_0=90$  кВ и 95 кВ.

Как и для единичной ЛТД ступени, наработка проводилась сериями по 10 импульсов с частотой 1 импульс в 30 секунд. После каждых 10 импульсов делался

перерыв 30 минут. Через каждые 50 импульсов делался перерыв 2 часа, а в случае окончания рабочего дня перерыв составлял более 12 часов.

В серии из 300 импульсов при зарядном напряжении  $U_0=90$  кВ среднее время задержки между импульсами пускового напряжения и напряжения на нагрузке  $\langle t_d \rangle$  и среднеквадратичное отклонение от среднего значения (джиттер)  $\sigma$  составили:

$$\langle t_d \rangle \pm \sigma = 95 \pm 2 \text{ нс},$$

где время задержки определялось между уровнями 10 % от амплитуды импульсов. Средняя амплитуда напряжения на нагрузке  $\langle U_{load} \rangle$  и среднеквадратичное отклонение амплитуды от среднего значения  $\sigma$  составили:

$$\langle U_{load} \rangle \pm \sigma = 64.1 \pm 2.2 \text{ кВ}.$$

В серии из 50 импульсов при зарядном напряжении  $U_0=95$  кВ:

$$\langle t_d \rangle \pm \sigma = 90 \pm 2 \text{ нс};$$

$$\langle U_{load} \rangle \pm \sigma = 66 \pm 1.2 \text{ кВ}.$$

В модуле получена точность включения с джиттером в единицы наносекунд.

Среднеквадратичное отклонение амплитуды выходного импульса модуля из двух ЛТД ступеней в длинной серии из 300 импульсов составило 3.5 % от среднего значения, а в короткой, из 50 импульсов 1.8 %. Разброс в амплитуде связан с нагревом жидкостной нагрузки в серии импульсов, что освещено в подразделе 4.5.3, посвященному наработке единичной ЛТД ступени.

Одна из ЛТД ступеней до испытаний модуля уже имела наработку более 400 импульсов, а один из сегментов уже имел наработку более 650 импульсов. С учетом наработки модуля из двух ЛТД ступеней, суммарная наработка одного из сегментов ступени составила более 1 000 импульсов при зарядном напряжении  $U_0=90-95$  кВ; суммарная наработка одной из ЛТД ступеней составила более 750 импульсов при зарядном напряжении  $U_0=90-95$  кВ.

### 6.3 Модуль в составе пяти ЛТД ступеней

#### 6.3.1 Схема испытания и исследования модуля в составе пяти ЛТД ступеней

Модуль в составе пяти ЛТД ступеней с горизонтальным расположением показан на рисунке 6.25. Схема испытаний и исследования характеристик модуля в составе пяти

ступеней аналогична схеме для единичной ступени и модуля в составе двух ступеней. Использовался аналогичный состав измерительных датчиков.



Рисунок 6.25 – Модуль в составе пяти ЛТД ступеней с горизонтальным расположением в ходе испытаний

Конструкция нагрузки для испытания и исследования модуля в составе пяти ступеней аналогична представленной в подразделе 6.1.5.1. Различие состоит лишь в длине резисторов нагрузки, увеличенной со 156 мм до 1000 мм. Рассчитанная по формуле (6.1) индуктивность такой нагрузки составляет около 22 нГн.

Параметры выходных импульсов модуля получены при варьировании зарядного напряжения ступеней от 70 кВ до 90 кВ и сопротивления резистивной нагрузки от 0.21 до 0.25 Ом. Экспериментальные осциллограммы тока разряда  $I_{load}$ , напряжения на выходе ступеней модуля  $U_1-U_5$  и напряжения на нагрузке  $U_{load}$ , а также расчетные кривые выходной мощности  $W$  и выведенной в нагрузку энергии  $E$  при работе модуля в составе пяти ЛТД ступеней на резистивные нагрузки с «холодным» сопротивлением  $R_{load} \approx 0.21, 0.23$  и  $0.25$  Ом при зарядном напряжении 85 кВ демонстрируют рисунки 6.26–6.28. Следует отметить, что при расчете мощности  $W = U_{load} \times I_{load}$  корректировка на индуктивную составляющую в измеряемом напряжении на нагрузке не производилась.

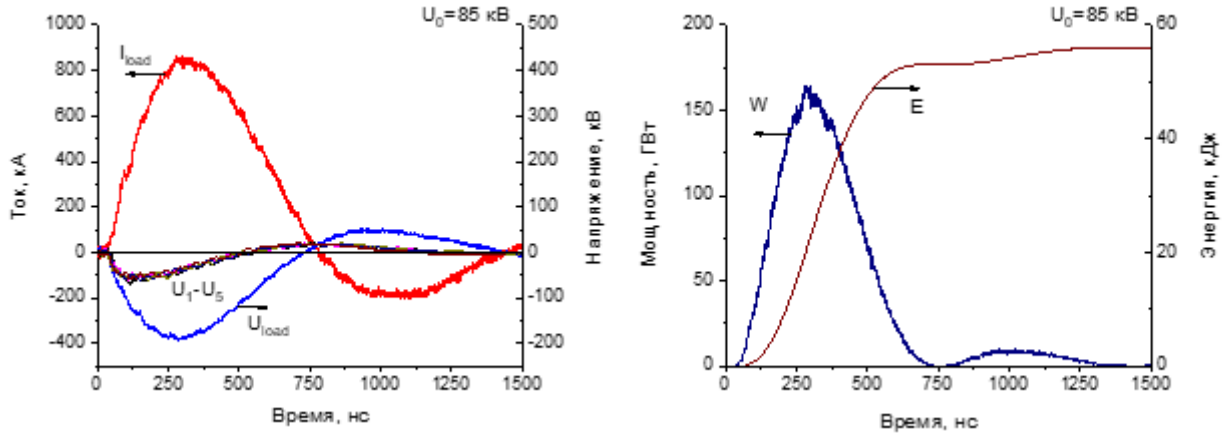


Рисунок 6.26 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда модуля из пяти ЛТД ступеней на нагрузку  $R_{load}=0.21$  Ом при зарядном напряжении  $U_0=85$  кВ:  $U_{load}, I_{load}$  – амплитуды напряжения и тока нагрузки;  $U_1-U_5$  – напряжения на выходе ступеней;  $W$  – выходная мощность модуля;  $E$  – энергия, выведенная в нагрузку

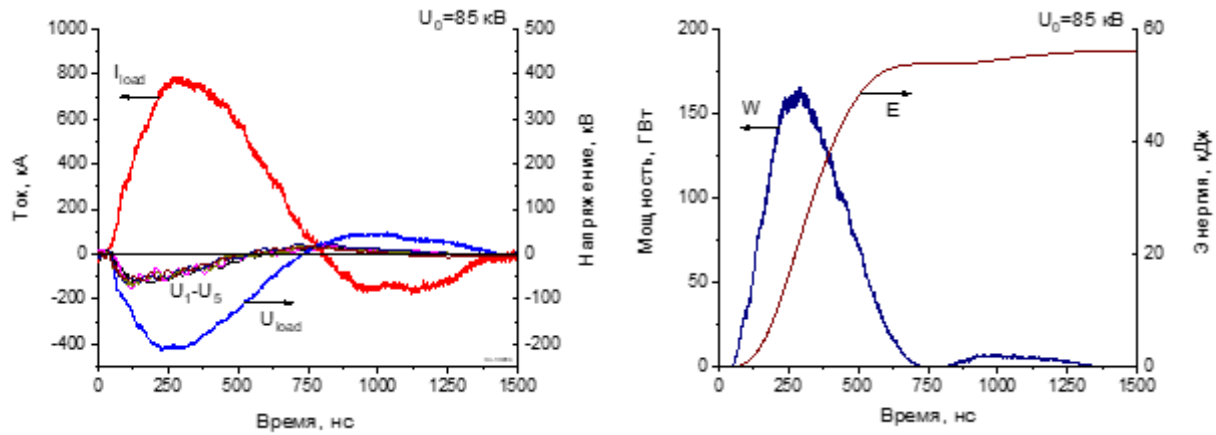


Рисунок 6.27 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда модуля из пяти ЛТД ступеней на нагрузку  $R_{load}=0.23$  Ом при зарядном напряжении  $U_0=85$  кВ:  $U_{load}, I_{load}$  – амплитуды напряжения и тока нагрузки;  $U_1-U_5$  – напряжения на выходе ступеней;  $W$  – выходная мощность модуля;  $E$  – энергия, выведенная в нагрузку

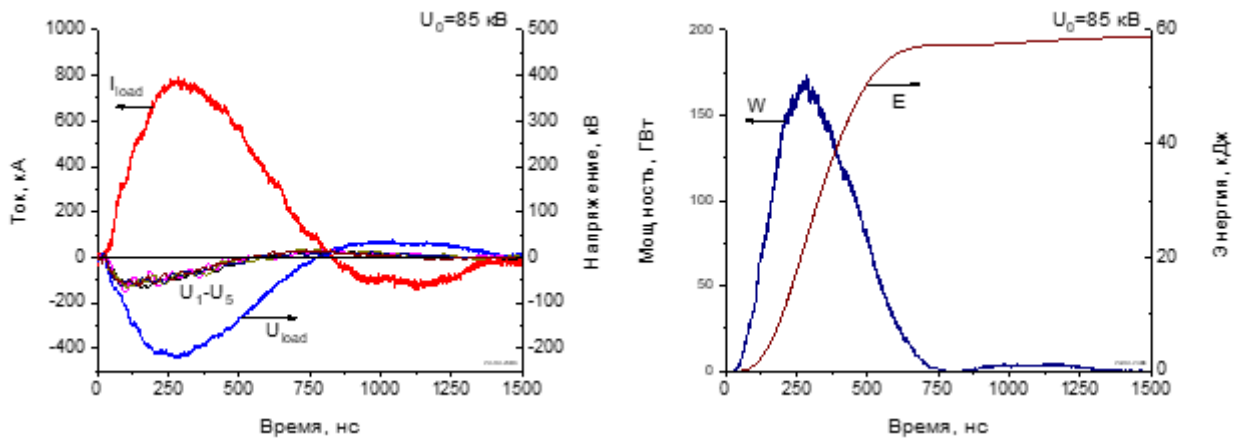


Рисунок 6.28 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда модуля из пяти ЛТД ступеней на нагрузку  $R_{load}=0.25$  Ом при зарядном напряжении  $U_0=85$  кВ:  $U_{load}, I_{load}$  – амплитуды напряжения и тока нагрузки;  $U_1-U_5$  – напряжения на выходе ступеней;  $W$  – выходная мощность модуля;  $E$  – энергия, выведенная в нагрузку

При увеличении сопротивления нагрузки с 0.21 Ом до 0.25 Ом напряжение на нагрузке увеличивается со 190 кВ до 230 кВ, амплитуда тока разряда модуля уменьшается с 850 кА до 770 кА, а реверс импульса тока снижается с 22 % до 15 %. Максимальная выходная мощность реализуется на нагрузке 0.25 Ом и составляет 165 ГВт при зарядном напряжении 85 кВ. В этом режиме разряда фронт импульса тока по уровню 0.1–0.9 составляет 155 нс; время вывода энергии в нагрузку между уровнями 0.1–0.9 от максимального значения в первой полуволне составляет 345 нс.

Рисунок 6.29 демонстрирует разряд модуля в составе пяти ступеней на нагрузку с сопротивлением  $R_{load} \approx 0.25$  Ом при изменении зарядного напряжения ступеней от 70 кВ до 90 кВ.

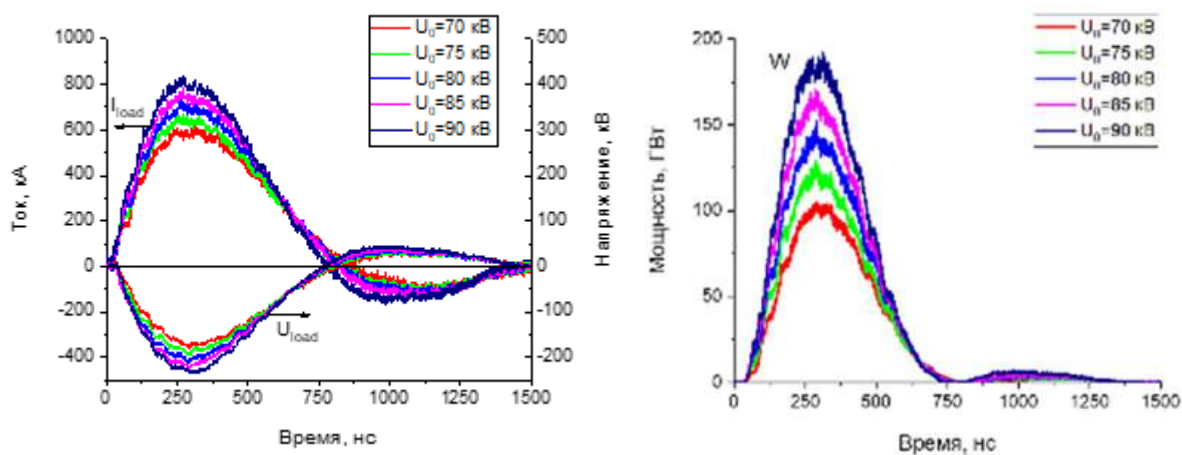


Рисунок 6.29 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда модуля из пяти ЛТД ступеней на нагрузку  $R_{load}=0.25$  Ом при зарядном напряжении  $U_0=70–90$  кВ:  $U_{load}$ ,  $I_{load}$  – амплитуды напряжения и тока нагрузки;  $W$  – выходная мощность модуля

Увеличение зарядного напряжения в  $\approx 1.3$  раза дает прирост тока в  $\approx 1.4$  раза и выходной мощности в 1.8 раза. При этом наблюдается незначительное снижение полупериода разряда с ростом зарядного напряжения. Непропорциональный зарядному напряжению рост тока модуля, а также снижение временной постоянной разряда может быть следствием: 1) снижения «горячего» сопротивления нагрузки с ростом тока и рассеиваемой в ней энергии; 2) улучшения коммутационной характеристики разрядников с ростом напряжения на них.

Параметры разряда для трех резистивных нагрузок при различных зарядных напряжениях ступени обобщены в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Результаты испытаний модуля из пяти ЛТД ступеней на резистивную нагрузку:  $U_0$  – зарядное напряжение ступени;  $U_{load}$ ,  $I_{load}$  – амплитуды напряжения и тока нагрузки;  $t_{1-9}$ – время нарастания импульса тока нагрузки по уровню 0.1–0.9;  $W$ – пиковая выходная мощность ступени;  $E$ – энергия, выведенная в нагрузку;  $t_{E(1-9)}$ – время вывода энергии в нагрузку между уровнями 0.1–0.9 от максимального значения первого полупериода

$U_0$ , кВ	$U_{load}$ , кВ	$I_{load}$ , кА	$t_{1-9}$ , нс	Реверс	$W$ , ГВт	$E$ , кДж	$t_{E(1-9)}$ , нс
$R_{load}=0.21$ Ом							
70	150	665	180	21	99	35	345
80	180	790	175	22	141	47	335
85	190	850	170	22	161	53	330
$R_{load}=0.23$ Ом							
70	170	610	180	17	103	36	350
75	180	685	180	18	123	42	340
80	200	720	170	18	141	48	340
85	210	780	170	19	164	55	340
90	225	830	165	19	185	61	335
$R_{load}=0.25$ Ом							
70	170	610	170	15	104	37	355
80	200	725	165	15	145	50	350
85	215	770	155	15	165	57	345
90	230	825	155	16	190	65	340

По сравнению с близким режимом разряда модуля в составе двух ЛТД ступеней, получено увеличение выходной мощности кратно числу ступеней в модуле с сохранением фронта импульса и характерного времени вывода энергии в нагрузку.

### 6.3.3 Нарботка модуля из пяти ЛТД ступеней

Нарботка модуля из пяти ЛТД ступеней составила более 100 импульсов. В серии из 50 импульсов при зарядном напряжении  $U_0=85$  кВ среднее время задержки  $\langle t_d \rangle$  между импульсами пускового напряжения и напряжения на нагрузке и среднеквадратичное отклонение от среднего значения (джиттер)  $\sigma$  составили:

$$\langle t_d \rangle \pm \sigma = 111 \pm 3 \text{ нс.}$$

При сопротивлении нагрузки  $R_{load}=0.23$  Ом средняя амплитуда напряжения на нагрузке  $\langle U_{load} \rangle$  и среднеквадратичное отклонение амплитуды от среднего значения  $\sigma$  составили:

$$\langle U_{load} \rangle \pm \sigma = 212 \pm 3 \text{ кВ.}$$

Средняя амплитуда тока в нагрузке  $\langle I_{load} \rangle$  и среднеквадратичное отклонение амплитуды от среднего значения  $\sigma$  составили:

$$\langle I_{load} \rangle \pm \sigma = 783 \pm 9 \text{ кА.}$$

Средняя пиковая мощность в нагрузке  $\langle W \rangle$  и среднеквадратичное отклонение амплитуды от среднего значения  $\sigma$  составили:

$$\langle W \rangle \pm \sigma = 165 \pm 2 \text{ ГВт.}$$

В модуле из пяти ЛТД ступеней получена наносекундная точность включения. Среднеквадратичное отклонение амплитуды выходного импульса модуля в серии из 50 импульсов составило единицы процентов от среднего значения. Относительный среднеквадратичный разброс выходных параметров остался на уровне, реализованном в модуле из двух ЛТД ступеней.

#### 6.4 Проект мультимегамперной ЛТД установки

На основе созданной ЛТД ступени разработан проект ЛТД установки с амплитудой тока  $I_m \geq 8 \text{ МА}$  и фронтом импульса по уровню  $(0.1-0.9) t_{1-9} = 200-300 \text{ нс}$  на нагрузке типа лайнер плоской геометрии.

##### 6.4.1 Определение оптимального числа ЛТД модулей и ЛТД ступеней в модуле

ЛТД установка представляет собой многомодульную систему, в которой  $M$  идентичных модулей включаются параллельно на сумматор токов модулей и общую нагрузку. Каждый модуль состоит из  $N$  последовательно включенных идентичных ЛТД ступеней. Модульная конструкция позволяет по-разному сформировать ее эквивалентные емкость, индуктивность и, соответственно, временную постоянную в зависимости от числа модулей  $M$  и числа ступеней  $N$  в каждом модуле:

$$C_0 = C_C \frac{M}{N}, \quad (6.8)$$

$$L_0 = L_C \frac{N}{M} + L_{OUT}, \quad (6.9)$$

$$\tau_0 = \sqrt{L_0 C_0} = \sqrt{L_C C_C + L_{OUT} C_C \frac{M}{N}}, \quad (6.10)$$

где  $C_C = 4 \cdot C_S$  и  $L_C = (L_S/4 + L_1)$  – эквивалентные емкость индуктивность ЛТД ступени (см. схему на рисунке 6.18, в которой контур индуктора не учитывается, т.к.  $L_t \gg L_S$ );  $L_{OUT}$  – индуктивность узла в котором осуществляется сложение токов параллельных модулей и устанавливается нагрузка (сумматор тока). При фиксированном зарядном

напряжении ступени  $U_0$  эквивалентное зарядное напряжение накопителя  $C_0$  составит  $U=U_0 \times N$ . Выражение (6.10) примерно соответствует длительности фронта импульса тока по уровню 0.1–0.9 от амплитудного значения.

Оптимизация конфигурации ЛТД установки по числу модулей  $M$  и ступеней  $N$  в каждом модуле осуществлялась на основе критерия эффективности перевода запасенной электрической энергии в кинетическую энергию лайнера плоской геометрии [162]:

$$S = \frac{m v_F^2}{C_0 U_0^2} = \left( \frac{\partial \lambda}{\partial \tau} \right)_F \frac{L_0 \rho \delta \ell^3 / h}{(\mu_0 C_0 U_0)^2} = \frac{1}{2u^2} \left( \frac{\partial \lambda}{\partial \tau} \right)_F^2. \quad (6.11)$$

где  $m$  – масса лайнера;

$\rho$  – плотность материала лайнера;

$h$  – высота (длина) лайнера;

$\ell$  – ширина лайнера;

$\delta$  – толщина лайнера;

$\tau = \frac{t}{\sqrt{L_0 C_0}}$  – безразмерное время;

$\lambda = \frac{\mu_0 h}{L_0 \ell} X$  – безразмерная индуктивность движущегося лайнера при расстоянии до

обратного токопровода  $X$ . Конечное значение индуктивности лайнера  $\lambda_F$  определяется конечной длиной области ускорения объекта  $X_F$ .

Безразмерный ток  $I$  в задаче оптимизации:

$$\eta = \frac{\mu_0 I}{\sqrt{2 \rho \delta \ell^3 / h C_0}}. \quad (6.12)$$

При заданных параметрах лайнера и электрического контура ЛТД ступени единственным варьируемым безразмерным параметром задачи оптимизации является  $u$ , который определяется как

$$u = \mu_0 \frac{h}{\ell} \frac{\sqrt{C_0 U_0^2 / 2m}}{\sqrt{L_0 / C_0}}. \quad (6.13)$$

На рисунке 6.30 приведена расчетная зависимость эффективности передачи энергии в нагрузку  $S$  от безразмерного параметра  $u$  [157]. Пунктирной линией на рисунке показана линейная зависимость положения точек максимальной эффективности на координатной плоскости. Графики на рисунке позволяют оценить эффективности  $S$  используя параметры  $\lambda_F$  и  $u$ .



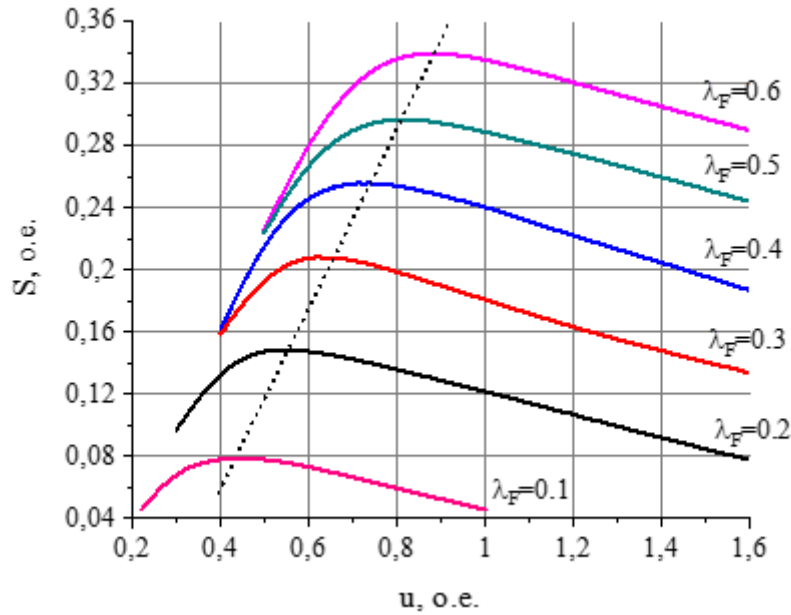


Рисунок 6.30 – Зависимости эффективности передачи энергии в лайнер  $S$  от безразмерного параметра  $u$  при фиксированной финальной индуктивности объекта  $\lambda_F$

При фиксированном произведении ( $M \cdot N$ ), которое задает общее число ступеней и определяет энергозапас установки  $E_0$ , перебираются разные комбинации  $M$  и  $N$  и рассчитываются эквивалентные параметры установки  $C_0$ ,  $L_0$ ,  $\tau_0$ , эквивалентное зарядное напряжение  $U=U_0 \times N$  накопителя  $C_0$ , финальная безразмерная индуктивность  $\lambda_F$  и безразмерный параметр  $u$ . Проверяется ток для выбранных комбинаций  $M$  и  $N$ . Если амплитуда тока ниже требуемой, то произведение ( $M \cdot N$ ) увеличивается и алгоритм повторяется. В качестве оптимальных отбираются комбинации  $M$  и  $N$ , при которых эффективность  $S$  имеет наибольшие значения.

В таблице 6.8 приведены выходные параметры отобранного варианта ЛТД установки в конфигурации, близкой к оптимальной: число модулей  $M=10$ , число ступеней в модуле  $N=12$ . Расчет выполнялся для лайнерной нагрузки с параметрами:

- высота лайнера  $h=40$  мм;
- отношение (ширина  $\ell$ ) / (толщина  $\delta$ ) = 15 мм / 2 мм;
- начальное расстояние до обратного токопровода 2 мм;
- материал лайнера алюминий, плотность  $\rho=2700$  кг/м<sup>3</sup>;
- расстояние ускорения  $X_F=4$  мм.

В качестве рабочего зарядного напряжения ступеней принято  $U_0=85$  кВ, т.е. 85 % от максимального зарядного напряжения конденсаторов. Также принято, что в (6.9)

индуктивность  $L_{OUT} = 23$  нГн и она складывается из двух слагаемых: индуктивности центрального узла нагрузки 16.3 нГн и начальной индуктивности лайнера 6.7 нГн.

Таблица 6.8 – Параметры 8 МА ЛТД установки

$M$	$N$	$M \cdot N$	$L_0,$ нГн	$C_0,$ нФ	$\tau_0,$ нс	$\lambda_F/S$	$u/U$ [МВ]	$\eta_{max}/I_{max}$ [МА]	$E_0,$ МДж
10	12	120	31	3200	300	0.43/0.27	0.8/1.0	0.64/8.59	1.66

Более точные данные получаются в численном расчете разряда ЛТД установки в программах схемотехнического моделирования типа PSpice или Micro-Cap с использованием модели ЛТД ступени из подраздела 6.1.6. Принимается, что энергия от модулей подводится к центральному узлу нагрузки водяными коаксиальными линиями длиной около 4.5 м с соотношением диаметров внешнего и внутреннего проводников 1240 мм / 1080 мм и волновым сопротивлением  $\rho_t = 0.9$  Ом. Волновое сопротивление передающих линий модулей установки выбрано из условия:

$$\rho_t \approx 0.9 \times 2(N \cdot \rho_C), \quad (6.14)$$

где  $\rho_C = \sqrt{\frac{(L_S/4 + L_1)}{4C_S}} = 0.04$  Ом – волновое сопротивление единичной ЛТД ступени. Длина линий определяется необходимостью размещения вокруг центрального узла нагрузки десяти модулей.

Движущийся лайнер в схеме моделируется источником напряжения, генерирующим разность потенциалов, равную величине  $\frac{d}{dt}(L'(t) \cdot I(t))$ , где  $L'(t)$  – зависящая от времени индуктивность лайнера:

$$L'(t) = \mu_0 \frac{h}{\ell} X(t). \quad (6.15)$$

Для нахождения положения лайнера  $X(t)$  решается уравнение движения лайнера

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = \frac{\mu_0}{2\rho\delta\ell^2} I^2(t), \quad (6.16)$$

совместно с расчетом контура установки, задающего ток через лайнер  $I(t)$ .

Результат расчета разряда ЛТД установки в составе 10 модулей из 12 ступеней на нагрузку типа лайнер плоской геометрии при зарядном напряжении 85 кВ приведен на рисунке 6.31 и обобщен в таблице 6.9. Согласно расчетам, амплитуда тока превышает 8 МА, а время нарастания импульса тока по уровню 0.1–0.9 менее 250 нс.

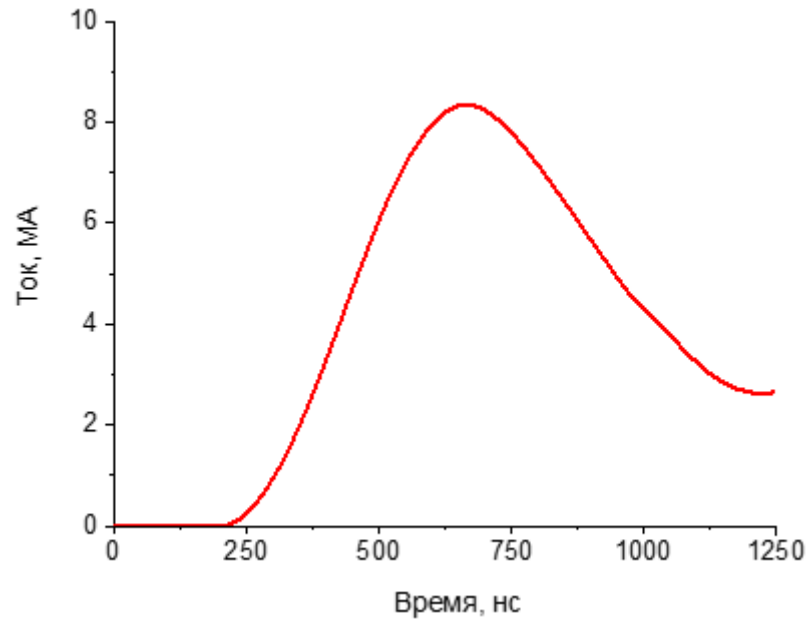


Рисунок 6.31 – Ток ЛТД установки в составе 10 модулей из 12 LTD-ступеней при разряде через плоский алюминиевый лайнер шириной 15 мм, толщиной 2 мм и высотой 40 мм

Таблица 6.9 – Результаты расчета в программе Мисгосар разряда ЛТД установки в составе 10 модулей из 12 ступеней через нагрузку типа лайнер при зарядном напряжении 85 кВ:  $m$  – масса лайнера,  $I_{max}$  – амплитуда тока через лайнер,  $t_{1-9}$  – время нарастания тока по уровню (0.1–0.9) от амплитудного значения,  $v_{liner}$  – скорость лайнера,  $E_k$  – кинетическая энергия лайнера,  $E_k/E_0 \times 100\%$  – эффективность вывода энергии из емкостного накопителя в кинетическую энергию лайнера

Лайнер $\ell/\delta$ , мм/мм	$m$ , г	$E_0$ , кДж	$I_{max}$ , МА	$t_{1-9}$ , нс	$v_{liner}$ , км/с	$E_k$ , кДж	$E_k/E_0$ , %
15/2	3.24	1664.4	8.3	228	13.5	295	18

#### 6.4.2 Модуль из двенадцати ЛТД ступеней

Полноразмерный модуль в составе двенадцати ЛТД ступеней для проекта мультимегаамперной ЛТД установки спроектирован, изготовлен, собран и подготовлен к испытаниям. Внешний вид модуля показан на рисунке 6.32.

Размеры модуля: Д × Ш × В = 4 м × 3 м × 4 м. Вес: около 30 т.

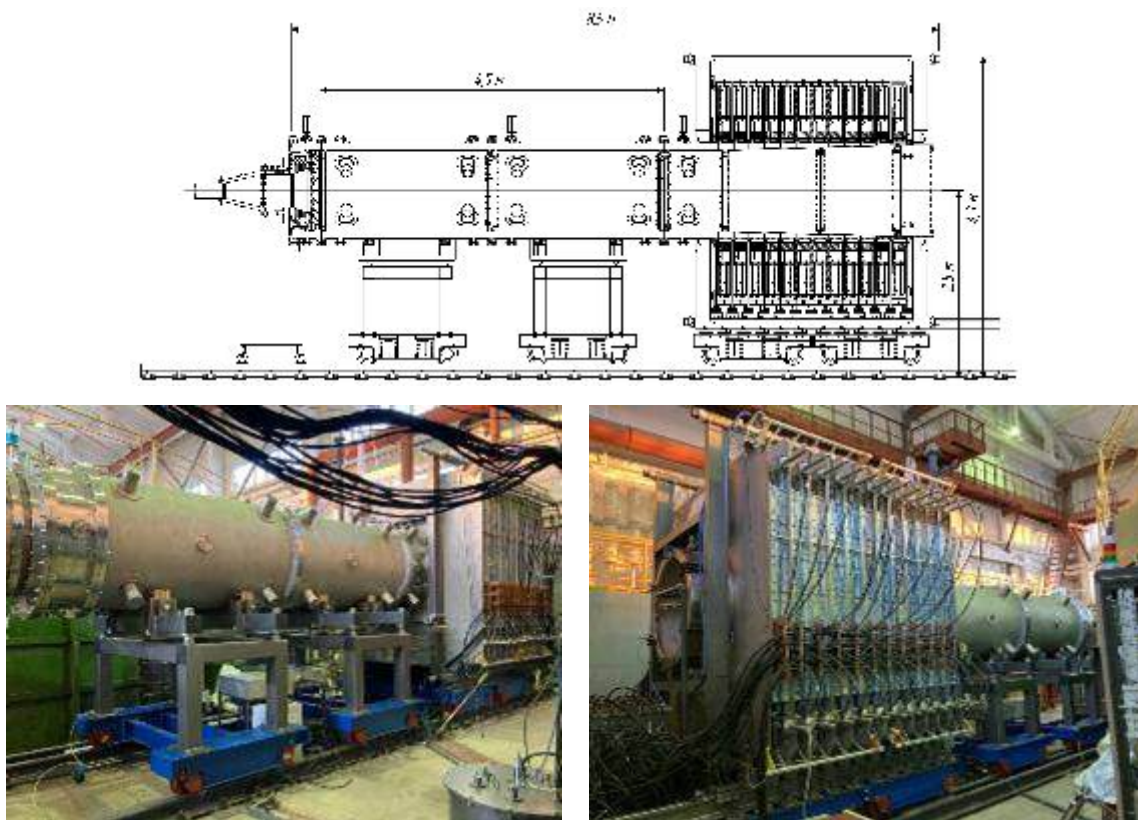


Рисунок 6.32 – Модуль в составе двенадцати ЛТД ступеней с передающей линией

## 6.5 Выводы

Создана ЛТД ступень с изоляцией воздухом атмосферного давления с запасаемой энергией 17.3 кДж при зарядном напряжении 95 кВ. Ступень позволяет получить в нагрузке 0.04 Ом импульс тока амплитудой около 1 МА с фронтом по уровню 0.1–0.9 около 160 нс. Ступень позволяет вывести в нагрузку более 70 % запасенной в емкостном накопителе энергии с пиковой мощностью  $\approx 40$  ГВт за характерное время  $\approx 300$  нс. Она является самой мощной и энергоемкой из ЛТД ступеней с воздушной изоляцией на момент выполнения работы.

Впервые создан модуль из пяти мегаамперных ЛТД ступеней, использующих воздух в качестве изоляции. В модуле сохранено преимущество использования воздуха в качестве изоляции, а именно возможность проведения профилактических и ремонтных работ емкостного накопителя ЛТД ступеней без разборки модуля. Максимальная выходная мощность модуля реализуется на нагрузке около 0.25 Ом и составляет 190 ГВт при зарядном напряжении ступеней 90 кВ. В модуле реализовано увеличение выходной мощности кратно числу ЛТД ступеней за счет увеличения напряжения при сохранении амплитуды тока, фронта импульса и характерного времени вывода энергии в нагрузку.

## 7 Примеры применения импульсных генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления

Разработанные секции с воздушной изоляцией имеют широкий спектр применений и успешно используются в генераторах запускающих импульсов, источниках плазмы, электронных ускорителях, низкоомных генераторах тока и т.д. [163–170]. В данном разделе приведены примеры таких применений, демонстрирующие возможности и достоинства созданных секций, а также ЛТД технологии в целом:

1) Исполнение емкостного накопителя из конструктивно независимых низкоиндуктивных секций с воздушной изоляцией позволяет создавать субмикросекундные сильноточные генераторы тока прямого действия, отличающиеся простотой конструкции и обслуживания, гибкостью конфигурации с возможностью простой перестройки под требования конкретной задачи (подраздел 7.1);

2) Секции с малой емкостью позволяют создавать генераторы прямого действия с длительностью высоковольтного импульса менее 100 нс для целей радиографии быстропротекающих процессов (подраздел 7.2);

3) Низкое волновое сопротивление разрядного контура ЛТД генераторов ( $\sim 1$  Ом) делает возможным создание мощных низкоомных источников СВЧ-излучения (подраздел 7.3);

4) Конструктивные особенности ЛТД генераторов делают их удобным инструментом для исследований и разработки источников электронного пучка. Конструкция ЛТД ступеней позволяет размещать в них не только однотипные секции, но и секции с различающимися параметрами, а также использовать отдельный запуск секций внутри одной ступени. Это делает возможным, например, формировать на нагрузке два последовательных импульса напряжения с контролируемой задержкой по времени для улучшения характеристик диода со взрывоэмиссионным катодом (подраздел 7.5). Также, поскольку в ЛТД генераторе один край центрального проводника выходной коаксиальной линии находится под нулевым потенциалом, устраняется проблема подвода энергии к источникам плазмы на потенциальном электроде и расширяются возможности реализации источников электронного пучка на

основе диода с предварительным плазменным заполнением от дополнительного источника (подразделы 7.4 и 7.6).

### 7.1 Субмикросекундный генератор тока для экспериментов с лайнерными нагрузками

Для экспериментов с низкоиндуктивными нагрузками (порядка  $10^{-8}$  Гн) требуются генераторы тока субмегаамперного и мегаамперного диапазонов с фронтом тока  $\approx 0.5$  мкс. Указанные параметры реализуются в генераторах на основе низкоиндуктивных конденсаторов и многоканальных разрядников [63, 64, 171].

На базе секций 80 нФ создан генератор с током более 0.5 МА [166]. Генератор содержит двадцать четыре параллельно включенные секции (рисунок 7.1). Секции объединены в четыре идентичные сборки  $C_1 - C_4$ , по шесть секций в каждой сборке. Сборки размещены по двум сторонам от области нагрузки.

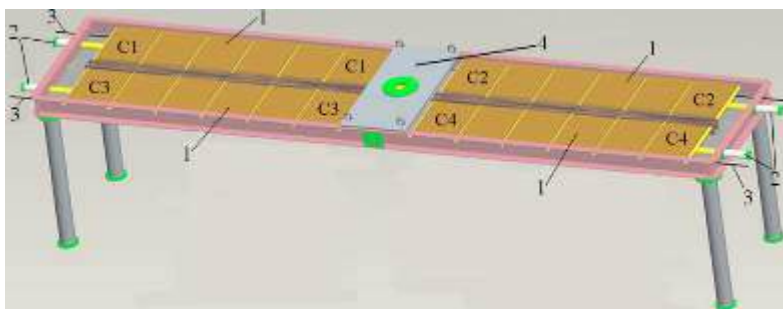


Рисунок 7.1 – Субмикросекундный генератор тока: 1– секции; 2– высоковольтный ввод зарядного напряжения; 3– пусковой проводник; 4– область нагрузки; 5– демпфирующие резисторы; 6– корпус генератора

Пример импульсов напряжения и тока генератора при работе на нагрузку с индуктивностью 17.5 нГн показаны на рисунке 7.2. Амплитуда тока достигает 590 кА, время нарастания тока около 400 нс.

Технические характеристики генератора и параметры импульса обобщены в таблице 7.1.

Генератор поставлен в Технион – Израильский технологический институт в Хайфа, Израиль.

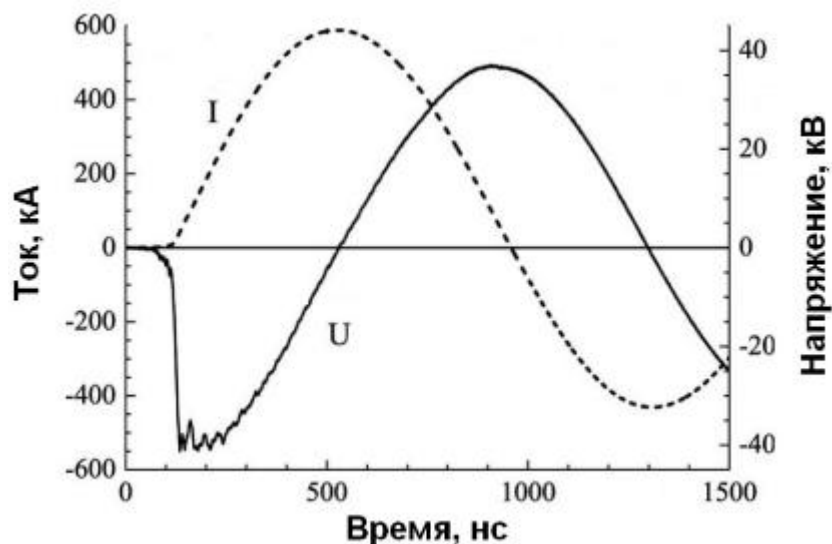


Рисунок 7.2 – Напряжение и ток в индуктивной нагрузке 17.5 нГн при зарядном напряжении генератора 80 кВ

Таблица 7.1 – Характеристики генератора и параметры импульса

Зарядное напряжение	$\leq 100$ кВ
Емкость накопителя	1.92 мкФ
Запасаемая энергия	$\leq 9.6$ кДж
Амплитуда тока нагрузки	$\leq 645$ кА
Время до максимума тока	390 нс
Размеры генератора	5.2 м $\times$ 1.2 м $\times$ 0.2 м
Вес	2 500 кг

## 7.2 ЛТД генератор для радиографии

ЛТД генератор с изоляцией воздухом атмосферного давления на основе секций 16 нФ позволяет получать импульсы длительностью менее 100 нс и может использоваться для целей радиографии. Примером такого генератора является ЛТД генератор (рисунок 7.3), созданный в компании ITHPP (Франция) на основе секций ИСЭ СО РАН [167, 168]. Генератор состоит из 17 последовательно включенных ЛТД ступеней (рисунок 7.4). Единичная ступень содержит два секции 16 нФ, представленной в разделе 3. Размер ступени составляет 1426 мм  $\times$  640 мм  $\times$  108 мм.

Генератор может работать в режиме как отрицательной, так и положительной полярности импульса выходного напряжения (рисунок 7.5). При зарядном напряжении ступеней 95 кВ в электронном диоде с сопротивлением 24 Ом реализуется напряжение 820 кВ при амплитуде тока пучка 34 кА. Пиковая мощность достигает 29 ГВт. Фронт

импульса напряжения по уровню (0.1-0.9) составляет около 20 нс, длительность электрического импульса  $\approx 90$  нс, а длительность импульса тормозного рентгеновского излучения  $\approx 30$  нс.

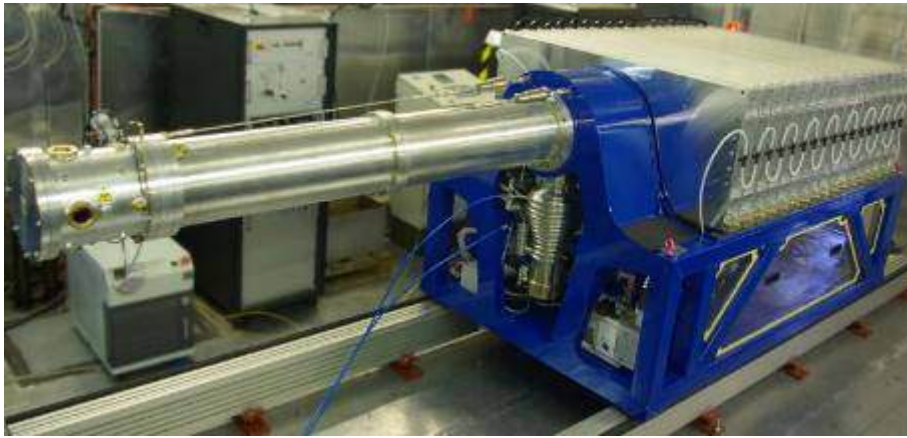


Рисунок 7.3 – ЛТД генератор в составе 17 ступеней для целей радиографии [168]

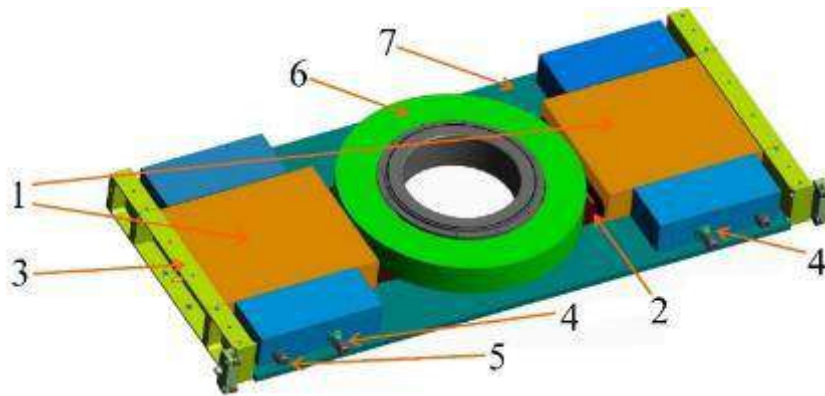


Рисунок 7.4 – ЛТД ступень с двумя секциями 16 нФ: 1– секции; 2, 3 – потенциальный и заземленный электроды ступени; 4– высоковольтный ввод для зарядного напряжения; 5– ввод для пускового импульса; 6– ферромагнитный сердечник; 7– изолятор

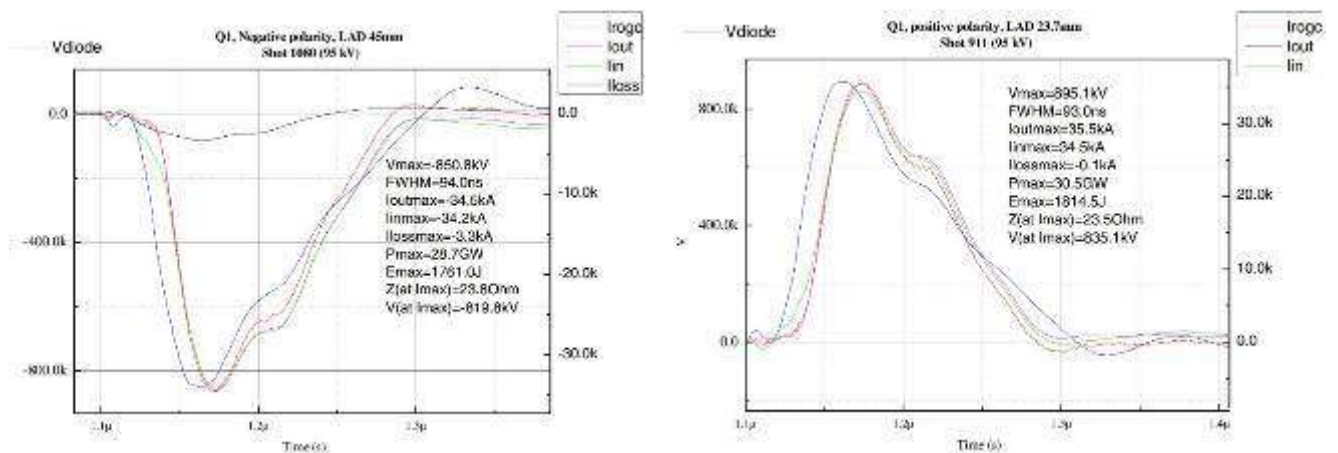


Рисунок 7.5 – Осциллограммы выходного напряжения и тока ЛТД генератора при отрицательной (слева) и положительной (справа) полярности выходного импульса [168]



### 7.3 Источник СВЧ-излучения на основе ЛТД генератора

Создан источник СВЧ-излучения на основе коаксиального виркатора (генератор с виртуальным катодом) с радиальной инжекцией электронного пучка, запитываемого от ЛТД генератора с шестью ступенями, каждая из которых состоит из четырех секций 80 нФ [172, 173]. Фотография источника и конструкция виркатора показаны на рисунке 7.6. Для генерации радиального электронного пучка используется цилиндрический диод со взрывоэмиссионным катодом. Эмитирующая часть катода шириной 30 мм выполнена из бархата. Электродинамическая система виркатора состоит из модулирующей секции и секции отбора энергии, где и образуется виртуальный катод. Металлические стенки, разделяющие диод, модулирующую секцию и секцию отбора энергии имеют окна из сеток, прозрачных для электронного пучка.

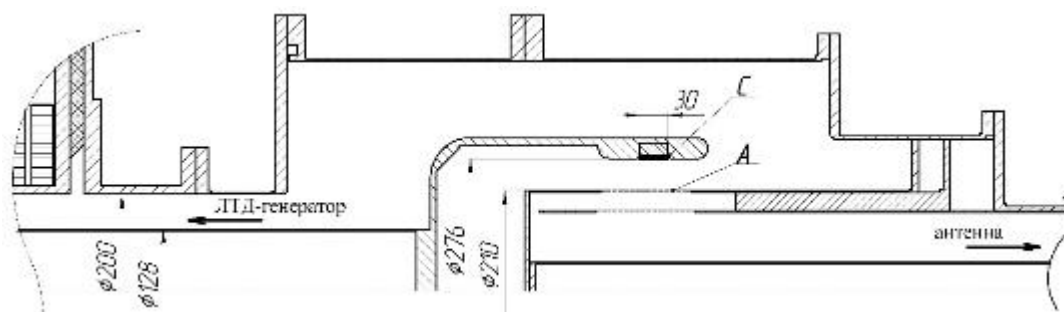


Рисунок 7.6 – Фотография источника СВЧ-излучения и конструкция виркатора с цилиндрическим электронным диодом: *C* – катод, *A* – анод

Работу источника при зарядном напряжении ступеней ЛТД генератора 70 кВ иллюстрирует рисунок 7.7. При амплитуде напряжения на диоде  $U_d = 300$  кВ и скорости нарастания напряжения на фронте до 5 кВ/нс катод имеет достаточно однородную эмиссионную поверхность, о чем свидетельствуют автографы пучка на винипрозе. Ток

электронного пучка  $I_d$  достигает 27 кА за 150 нс. Сопротивление диода  $R_d$  к моменту максимума тока выходит на квазипостоянный уровень около 10 Ом, который сохраняется в течение  $\approx 300$  нс.

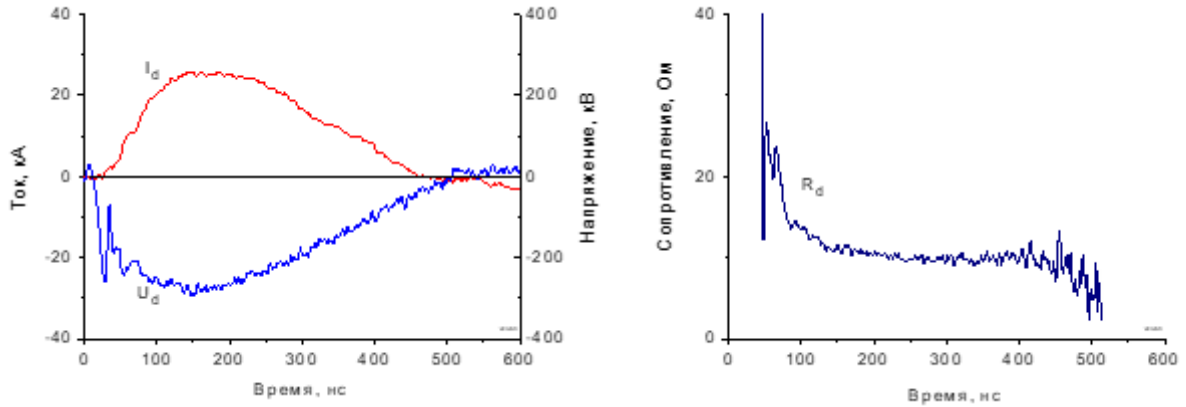


Рисунок 7.7 – Разряд ЛТД генератора на цилиндрический электронный диод:  $U_d$  – напряжение на диоде;  $I_d$  – ток в диоде;  $R_d$  – сопротивление диода

В источнике получена одномодовая генерация СВЧ излучения с импульсной мощностью 250 МВт на частоте 2.2 ГГц при длительности импульса 130 нс (рисунок 7.8). Эффективность генерации излучения относительно мощности пучка, инжектируемого в виркатор, составляет около 4 %.

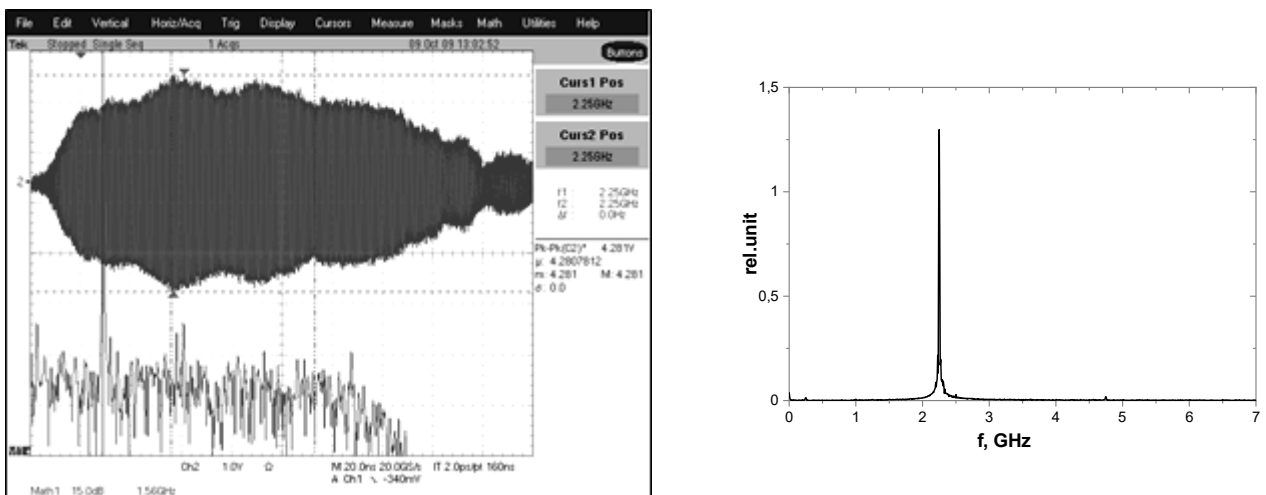


Рисунок 7.8 – СВЧ-сигнал с приемной антенны и его спектр

#### 7.4 Компактный генератор для источника электронного пучка

Генератор представляет собой одну ЛТД ступень и рассматривается как прототип установки для решения прикладных задач [164]. Конструкция и фотография генератора показаны на рисунке 7.9. Размеры генератора с нагрузкой составляют

0.35 м × 0.7 м × 1.2 м. В качестве емкостного накопителя используются две параллельно включенные секции 80 нФ (1), заключенные в металлический корпус (2). Зарядка конденсаторов секций осуществляется через высоковольтные вводы (3). Импульс пускового напряжения подается через ввод (4). Секции подключены к нагрузке по схеме ЛТД с использованием ферромагнитного сердечника (5). Сердечник содержит пять колец из ленты электротехнической стали ЭТ3425. Длина средней линии сердечника около 0.5 м. Подмагничивание сердечника осуществляется от дополнительного генератора импульсом тока амплитудой 640 А с фронтом 80 мкс и длительностью 1600 мкс.

Нагрузка устанавливается на конце центрального проводника вакуумной коаксиальной линии (6). В качестве изоляции внутри корпуса генератора и рабочей среды разрядников используется воздух при атмосферном давлении. Вакуумный и воздушный объемы генератора разделены проходным изолятором (7). Конструкция генератора позволяет работать с одной либо двумя секциями, варьируя энергозапас и сопротивление контура генератора.

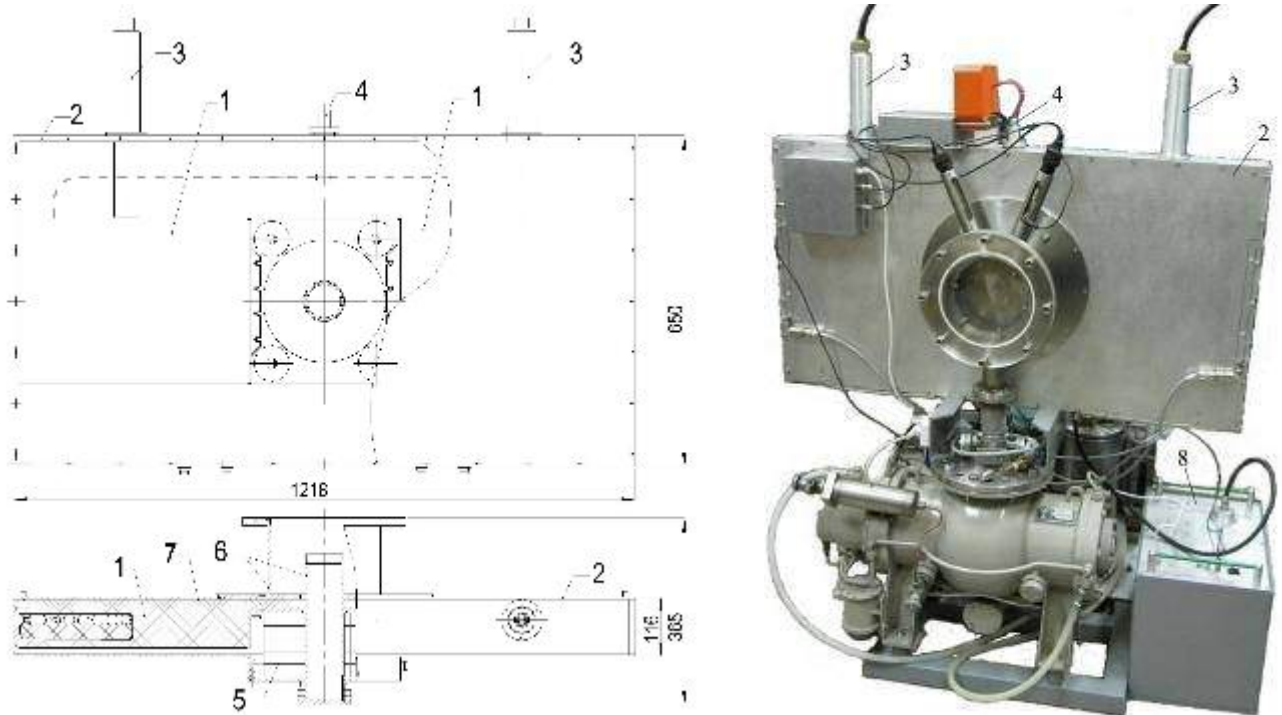


Рисунок 7.9 – Конструкция и фотография генератора: 1 – секции 80 нФ; 2 – корпус генератора; 3 – высоковольтный ввод; 4 – ввод пускового напряжения; 5 – ферромагнитный сердечник; 6 – выходной вакуумный коаксиал; 7 – проходной изолятор воздух-вакуум; 8 – генератор подмагничивания

Испытания генератора с постоянной резистивной нагрузкой выполнены с использованием 30 резисторов ТВО-10, 27 Ом, включенных параллельно. Сопротивление нагрузки  $R_{load}$  составляло около 1 Ом. Оценочная индуктивность нагрузки, включая выходной вакуумный коаксиал,  $L_{load} \approx 21$  нГн. Испытания проведены при зарядном напряжении 70 кВ, которое было ограничено пробоем по поверхности резисторов нагрузки в вакууме. Разряд генератора на постоянную резистивную нагрузку иллюстрирует рисунок 7.10.

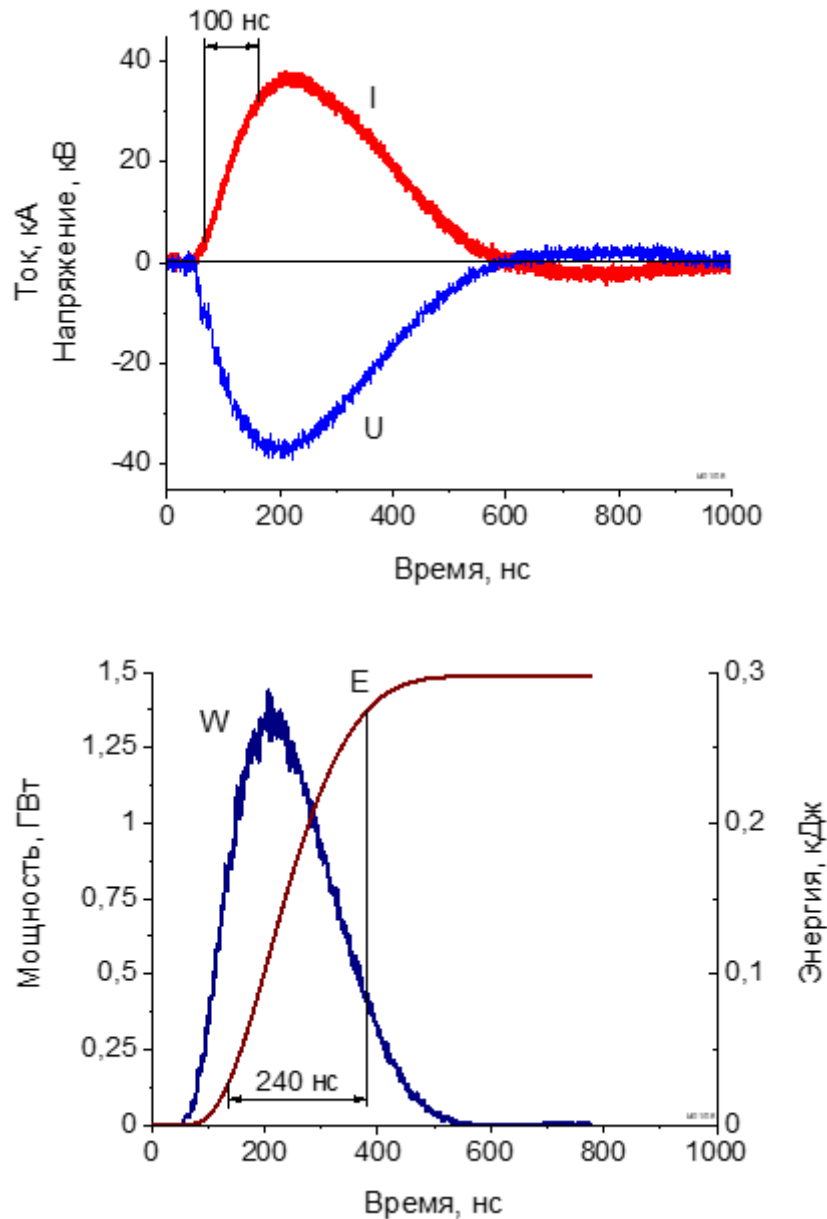


Рисунок 7.10 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда генератора с двумя секциями 80 нФ на резистивную нагрузку около 1 Ом при зарядном напряжении 70 кВ:  $I$ ,  $U$  – ток и напряжение нагрузки,  $W$  – мощность в нагрузке,  $E$  – энергия, выделившаяся в нагрузке

Результаты испытания обобщены в таблице 7.2, где используются следующие обозначения:  $U_m$ ,  $I_m$  – амплитуды напряжения и тока нагрузки;  $t_{1-9}$  – время нарастания импульса тока нагрузки по уровню 0.1-0.9;  $W$  – пиковая выходная мощность;  $E$  – энергия, переданная в нагрузку в течение первой полуволны импульса;  $t_{E(1-9)}$  – время вывода энергии в нагрузку между уровнями 0.1-0.9 от амплитуды первого полупериода.

Таблица 7.2 – Результаты включения генератора с одной и двумя секциями на резистивную нагрузку около 1 Ом при зарядном напряжении 70 кВ

Емкостной накопитель генератора	$U_m$ , кВ	$I_m$ , кА	$t_{1-9}$ , нс	$W$ , ГВт	$E$ , кДж	$t_{E(1-9)}$ , нс
Одна секция 80 нФ	29	29	100	0.8	0.13	200
Две секций 80 нФ	38	38	100	1.4	0.30	240

Результаты экспериментов с постоянной резистивной нагрузкой показывают, что в случае электронного диода с сопротивлением в единицы Ом можно рассчитывать на эффективность передачи энергии на уровне более 60 % за характерное время около 240 нс с пиковой мощностью энерговыделения гигаваттного уровня.

В первых экспериментах с электронным диодом использовался взрывэмиссионный катод, в котором для получения высокой напряженности электрического поля применялись стальные иглы диаметром 0.9 мм. Сорок две иглы размещались на диаметрах 50, 90 и 130 мм на плоскости охранного электрода диаметром 180 мм, предотвращающего эмиссию электронов с краев. Расстояние между торцами игл и анодом составляло 32 мм. В этих экспериментах рост тока в диоде начинался лишь спустя 70 нс после подачи импульса напряжения и сопровождался быстрым спадом сопротивления диода. Эффективность вывода энергии емкостного накопителя в электронный диод не превышала 30%.

Для улучшения эмитирующей способности катода при низком уровне напряжения в десятки киловольт в следующей конфигурации в прикатодной области предварительно создавалась плазма перед подачей основного импульса напряжения. Конструкция и фотография катодного узла показаны на рисунке 7.11. Диаметр полого цилиндрического катода 128 мм. Торец катода закрыт сеткой из нержавеющей стали. Межэлектродный зазор в диоде 44 мм. Плазма создается внутри центрального электрода за счет вспомогательного разряда низкого давления при принудительном иницировании

катодного пятна [174, 175]. Поскольку один конец центрального проводника вакуумного коаксиала генератора находится под нулевым потенциалом, нет препятствий завести питающий импульс к источнику плазмы, расположенном на центральном проводнике. Питание вспомогательного разряда осуществляется от отдельного генератора с емкостью накопителя 10 мкФ и зарядным напряжением до 3 кВ. Амплитуда тока вспомогательного разряда достигает 3 кА, время нарастания тока – 15 мкс. Основной генератор запускается в момент максимума тока вспомогательного разряда. В качестве рабочего газа в диоде используется аргон.

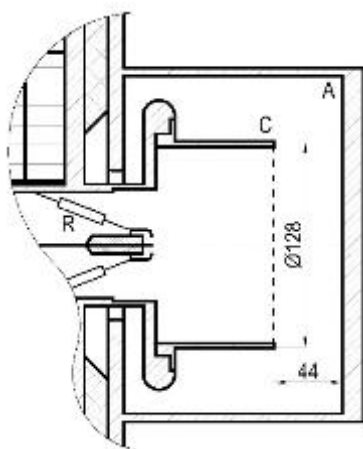
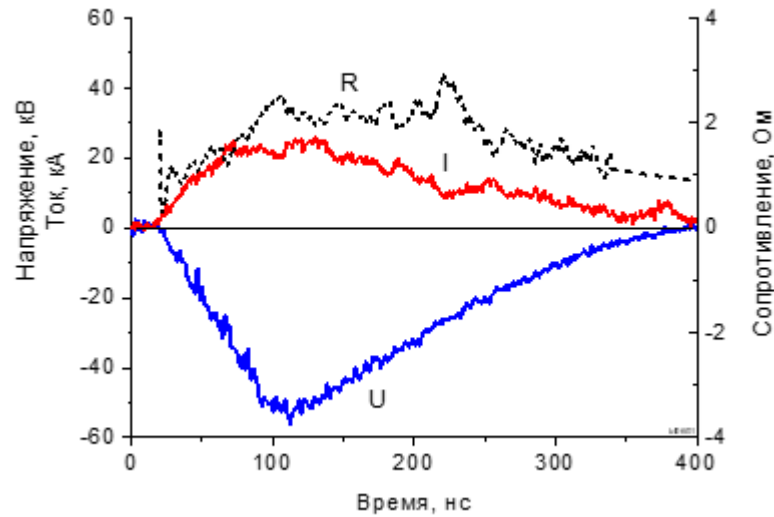


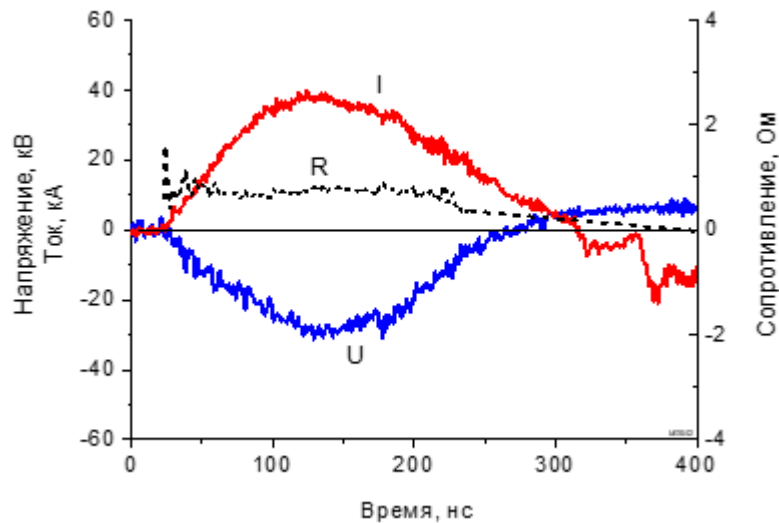
Рисунок 7.11 – Конструкция диода и фотография катода. А– анод; С– катод

Максимальные мощность и эффективность вывода энергии из емкостного накопителя реализованы при давлении остаточного газа  $5 \cdot 10^{-4}$  Торр. Работу диода при использовании на катоде сетки с прозрачностью 40 % демонстрирует рисунок 7.12, а. В диоде реализуется квазипостоянное сопротивление около 2 Ом и режим разряда, близкий к аperiodическому. В электронный пучок передается энергия 160 Дж за время 300 нс с пиковой мощностью 1.1 ГВт. Эффективность вывода энергии из емкостного накопителя составляет более 60 %. Автограф пучка на аноде имеет диаметр 6 см. Средняя плотность энергии на аноде за выстрел более 5 Дж/см<sup>2</sup>.

Изменение прозрачности катодной сетки позволяет варьировать сопротивление диода. Так при увеличении прозрачности до 65 % сопротивление диода снижается до 0.8 Ом (рисунок 7.12, б).



а)



б)

Рисунок 7.12 – Разряд генератора с одной секцией на диод при использовании на катоде сетки с прозрачностью 40 % (а) и 65 % (б).  $U$ ,  $I$ ,  $R$  – напряжение, ток и сопротивление диода, соответственно. Зарядное напряжение 80 кВ

### 7.5 Источник сильноточного электронного пучка субмикросекундной длительности со взрывоэмиссионным катодом и вспомогательным разрядом, инициируемым предимпульсом

Одним из способов улучшения согласования низкоомных генераторов (волновое сопротивление порядка 1–10 Ом) и электронного диода со взрывоэмиссионным катодом является предварительное создание плазмы в ускоряющем зазоре вспомогательным разрядом, что позволяет снизить сопротивление диода на фронте импульса. Для предварительного плазменного заполнения используются дополнительные электроды

вспомогательного разряда и отдельный генератор для питания этого разряда со своей системой зарядки и запуска, например, как в генераторе из подраздела 7.4. Возможен вариант схемы, в котором потенциальный электрод вспомогательного разряда и катод диода объединены. В этом случае на электрод подаются последовательно два импульса напряжения с задержкой по времени. При определенных условиях первый импульс (предымпульс) может приводить к снижению сопротивления диода и увеличению тока электронного пучка (эффект двойного импульса). Данное явление наблюдалось ранее в работах [176-178] и изучалось, например, в работе [179] применительно к импульсам длительностью в единицы наносекунд.

Исследован подход, связанный с использованием эффекта двойного импульса, применительно к источнику сильноточного электронного пучка субмикросекундной длительности на основе ЛТД генератора [140, 141].

#### 7.5.1 Схема источника сильноточного электронного пучка, конструкция ЛТД ступени

Схема источника со взрывоэмиссионным катодом и вспомогательным вакуумным разрядом, формируемым предымпульсом, приведена на рисунке 7.13. Резистивные и индуктивные элементы на схеме не показаны. Для питания диода используется ЛТД генератор со ступенями на основе емкостного накопителя  $C_1$  с управляемым разрядником  $S_1$ . Для формирования вспомогательного импульса в каждую ЛТД ступень введена дополнительная секция с емкостным накопителем  $C_2$ , коммутируемым управляемым разрядником  $S_2$ . Коммутация накопителей  $C_1$  и  $C_2$  осуществляется с контролируемой задержкой по времени  $t_d$  от источника пусковых импульсов. Выходная линия ЛТД генератора представляет собой вакуумный коаксиал с соотношением диаметров 200 мм / 70 мм. На конце линии установлен электронный диод, образованный лезвийным катодом и плоским анодом. Лезвие катода шириной 90 мм и толщиной 100 мкм выполнено из нержавеющей стали. Вакуумный объем диода и коаксиальной линии откачивается турбомолекулярным насосом до остаточного давления  $5 \cdot 10^{-5}$  Тор.



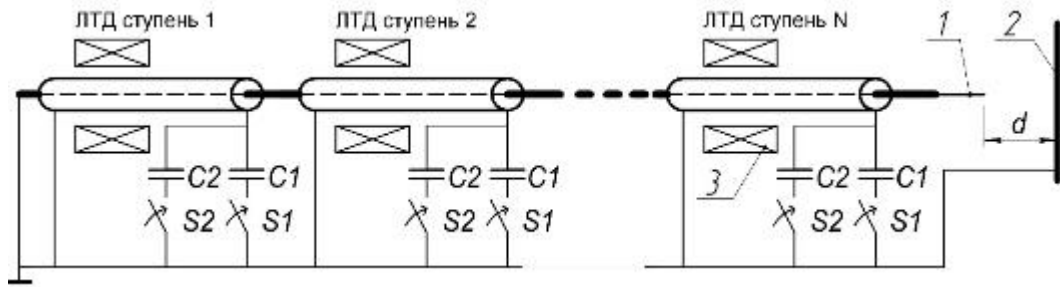


Рисунок 7.13 – Схема электронного источника с двойным импульсом напряжения:  
1– лезвийный катод; 2–анод диода; 3– ферромагнитный сердечник ступени

Конструкция ЛТД ступени, позволяющая формировать два последовательных импульса напряжения с контролируемой задержкой по времени, показана на рисунке 7.14.

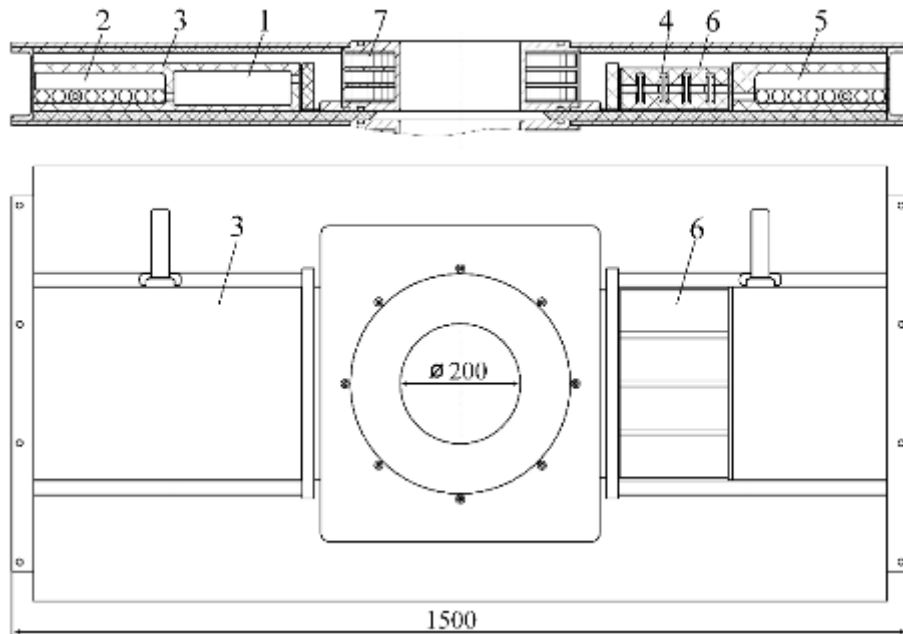


Рисунок 7.14 – Конструкция ЛТД-ступени с предимпульсом: 1 – основной емкостной накопитель энергии  $C_1$ ; 2 – разрядник  $S_1$  накопителя энергии  $C_1$ ; 3 – корпус накопителя энергии  $C_1$ ; 4 – вспомогательный емкостной накопитель энергии  $C_2$  для формирования предимпульса; 5 – разрядник  $S_2$  накопителя энергии  $C_2$ ; 6 – корпус накопителя энергии  $C_2$ ; 7 – ферромагнитный сердечник

Основной емкостной накопитель энергии  $C_1$  ступени выполнен из одной секции 80 нФ. Предимпульс в ЛТД ступени формируется дополнительным разрядным контуром на основе специально разработанной секции  $C_2$  с емкостным накопителем 3.2 нФ (рисунок 7.15). Конструкция этой секции в общих чертах аналогична секции 80 нФ. Отличие заключается в емкостном накопителе, который здесь выполнен из 16

керамических конденсаторов К15-10 (3300 пФ, 31.5 кВ). Конденсаторы объединены в четыре параллельно включенные сборки, каждая из которых содержит четыре последовательно включенных конденсатора. Накопитель также коммутируется семизазорным шестиканальным искровым разрядником, работающим в воздухе атмосферного давления. Сердечник ступени содержит три кольца из ленты электротехнической стали ЭТ3425. Вольт-секундный интеграл трех колец сердечника, соответствующий полному перемагничиванию, составляет 13 мВ·с.



Рисунок 7.15 – Секция с емкостью накопителя 3.2 нФ: 1 – конденсаторы К15-10, залитые компаундом; 2 – шестизазорный семиканальный искровой разрядник; 3 – высоковольтный ввод зарядного напряжения; 4 – пусковой проводник

Накопители  $C_1$  и  $C_2$  заряжаются от общего зарядного источника до напряжения 80 кВ. Уровень запасаемой энергии в дополнительном накопителе  $C_2$  составляет 4 % от энергии основного накопителя  $C_1$ . Два импульса на нагрузке формируются при последовательном разряде емкостных накопителей энергии  $C_1$  и  $C_2$ . Сначала при запуске разрядника  $S_2$  происходит разряд емкости  $C_2$  и формируется предимпульс. Амплитуда предимпульса одной ступени составляет около 30 кВ, длительность фронта по уровню (0.1-0.9) – 30 нс, длительность по основанию первой полуволны – 120 нс. Вольтсекундный интеграл первой полуволны предимпульса  $\approx 5$  мВ·с. С заданной задержкой по времени  $t_d$  запускается разрядника  $S_1$  и происходит разряд основного накопителя энергии  $C_1$ .

Следует отметить, что включение дополнительного разрядного контура с емкостным накопителем энергии  $C_2$  меняет режим работы разрядника  $S_1$  основного накопителя энергии. При разряде  $C_2$  напряжение на разряднике  $S_1$  сначала понижается в течение первой полуволны разряда. На второй полуволне, напряжение на непробитом разряднике  $S_1$  возрастает свыше напряжения зарядки накопителя  $C_1$ . Величина

перенапряжения определяется напряжением второй полуволны и достигает 10 кВ. При этом возникающее перенапряжение не успевает равномерно распределиться по зазорам разрядника  $S_1$ . Таким образом, в случае работы с предимпульсом требования к электрической прочности разрядника  $S_1$  повышаются.

### 7.5.2 Параметры выходного импульса источника

При использовании в ЛТД генераторе двух ступеней максимальная мощность и эффективность вывода энергии в электронный пучок реализуются при зазоре в диоде около 5 мм. Осциллограммы и расчетные кривые, демонстрирующие работу такого диода, приведены на рисунке 7.16. С двумя ЛТД ступенями амплитуда предимпульса составляет около 60 кВ, а амплитуда основного импульса превышает 100 кВ.

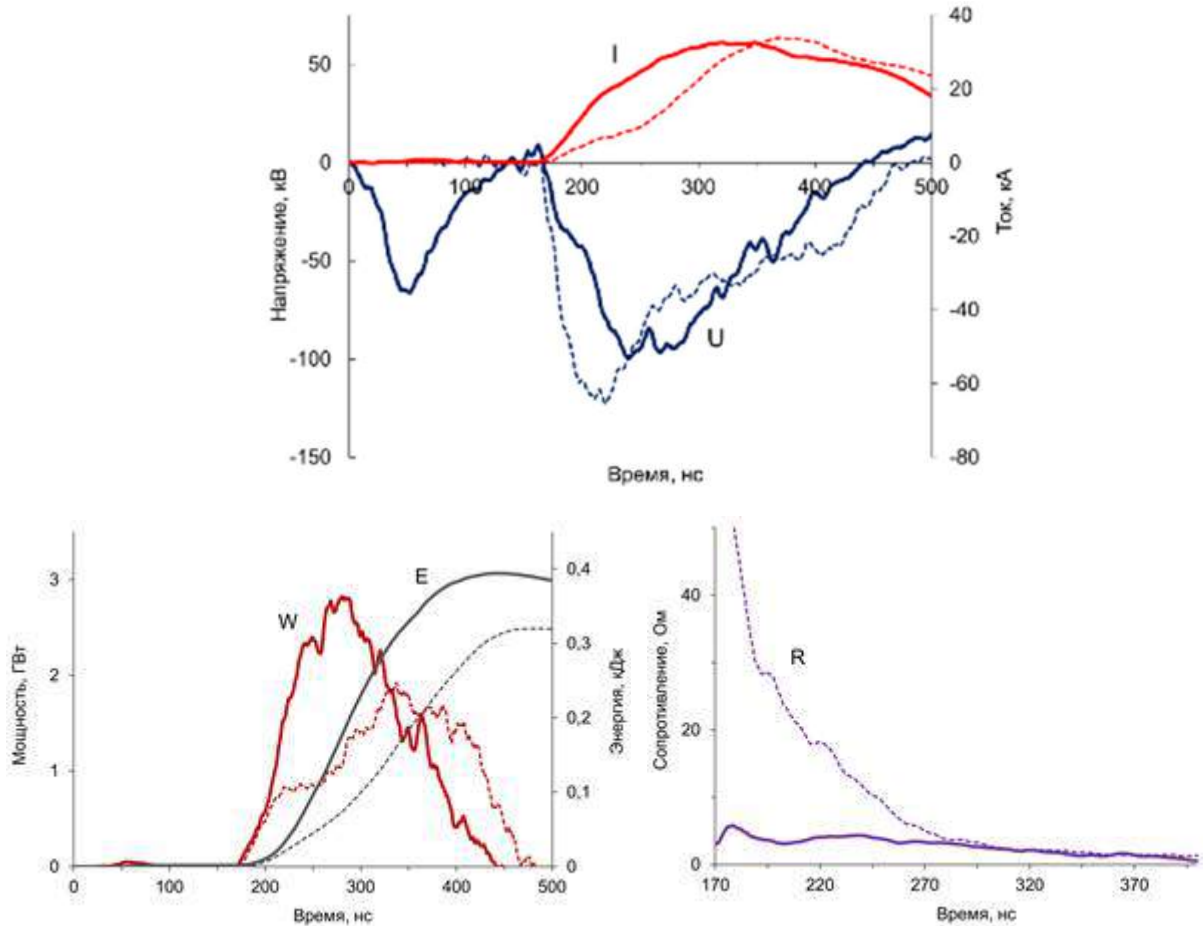


Рисунок 7.16 – Осциллограммы тока  $I$ , напряжения  $U$ , мощности  $W$ , энергии  $E$  и сопротивление диода  $R$  без предимпульса (пунктирные линии) и с предимпульсом (сплошные линии) при разряде ЛТД генератора с двумя ступенями

В отсутствии предымпульса на осциллограммах видно характерное запаздывание взрывоэмиссионного тока относительно импульса напряжения, связанное с достижением необходимой высокой напряженности электрического поля и образованием катодной плазмы. Средняя скорость нарастания тока на фронте напряжения составляет  $\sim 0.1$  кА/нс. В диоде рассеивается до 300 Дж энергии с эффективностью 59 % относительно запасаемой энергии в емкостном накопителе. Сопротивление диода в течение первых 50–100 нс удовлетворительно описывается выражением для диода с лезвийным катодом в режиме ограничения тока пространственным зарядом с учетом движения электродной плазмы со скоростью  $\approx 2 \cdot 10^6$  см/с. За время 100 нс сопротивление диода спадает более чем на порядок от начального значения порядка 100 Ом до  $\approx 5$  Ом.

Характеристики диода существенно изменяются, если основному импульсу напряжения предшествует предымпульс. Ток разряда основного накопителя  $C_1$  начинает нарастать без запаздывания относительно импульса напряжения. Средняя скорость нарастания тока на фронте напряжения возрастает в 4 раза в сравнении с разрядом без предымпульса. Увеличивается пиковая мощность и энергия в диоде. Из 532 Дж запасаемой энергии (с учетом энергии в накопителе  $C_2$ ) в диод передается до 380 Дж с эффективностью до 71 %. Максимальная эффективность реализуется в диапазоне времени задержки основного импульса относительно предымпульса  $t_d=200$ –500 нс. При амплитуде ускоряющего импульса напряжения 100 кВ около 65 % энергии вводится в диод при напряжении свыше 50 кВ. Для сравнения, при работе без предымпульса доля вводимой энергии при напряжении на диоде свыше 50 кВ не превышает 35 % от полной энергии, рассеиваемой в диоде.

Увеличение эффективности вывода энергии связано со снижением сопротивления диода на фронте импульса и, как следствие, с улучшением согласования диода с низкоомным ЛТД генератором. После подачи основного импульса напряжения от накопителя  $C_1$  сопротивление диода за время  $\sim 10$  нс устанавливается на квазипостоянном уровне в единицы Ом, близком к волновому сопротивлению разрядного контура генератора.

В варианте генератора с шестью ЛТД ступенями амплитуды напряжения предымпульса и основного импульса увеличились и составили 150 кВ и 300 кВ, соответственно. Увеличение напряжения потребовало двукратно увеличить анод-

катодный зазор в диоде для обеспечения эффективного вывода энергии из емкостного накопителя в диод. Так, при работе без предымпульса максимальная эффективность вывода энергии в диод реализуется при зазоре 8–10 мм. При работе с предымпульсом максимальная эффективность вывода энергии получена при зазоре в диоде около 13 мм и времени задержки основного импульса относительно предымпульса  $t_d=250\text{--}500$  нс. Осциллограммы и расчетные кривые, демонстрирующие работу в режиме максимальной эффективности вывода энергии в диод, показаны на рисунке 7.17.

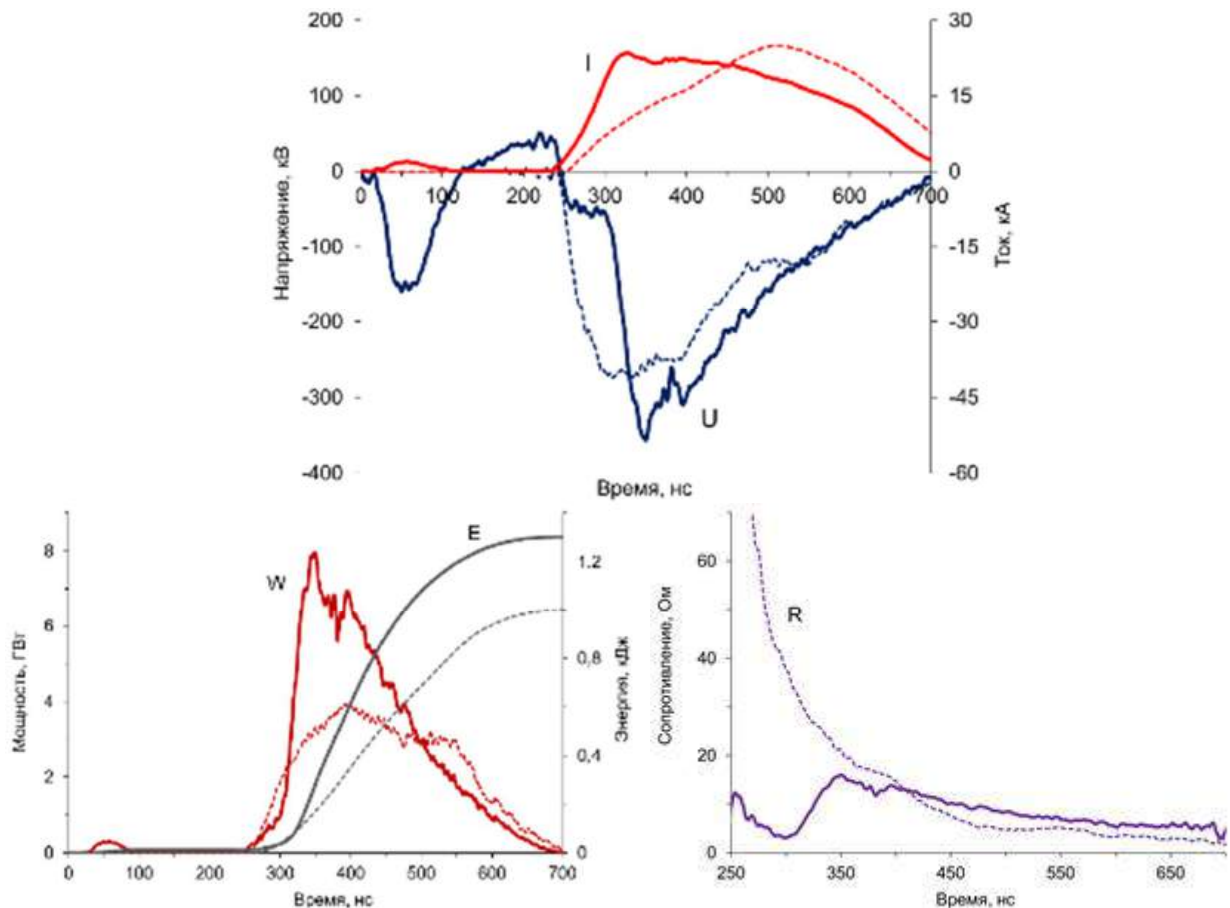


Рисунок 7.17 – Осциллограммы тока  $I$ , напряжения  $U$ , мощности  $W$ , энергии  $E$  и сопротивление диода  $R$  без предымпульса (пунктирные линии) и с предымпульсом (сплошные линии) при разряде ЛТД генератора с шестью ступенями

В общих чертах эффект от использования предымпульса аналогичен полученному в экспериментах с двумя ЛТД ступенями. За счет предымпульса увеличивается скорость нарастания тока и снижается сопротивление диода на фронте импульса напряжения, что приводит к увеличению пиковой мощности и эффективности вывода энергии в диод. Энергия в диоде достигает 1.28 кДж, что соответствует эффективности вывода энергии из емкостного накопителя 80 %. Для примера, в отсутствии предымпульса в диод передается около 1 кДж с эффективностью 65 %.

### 7.5.3 Распределение плотности энергии пучка на аноде

С помощью тепловизионной диагностики было выполнено исследование влияния предимпульса на распределение плотности энергии пучка на аноде. Измерялось распределение температуры на тыльной стороне металлической мишени, нагреваемой падающим на нее пучком. Из распределения температуры рассчитывалось распределение плотности энергии по сечению пучка. Тепловизионный метод ранее успешно применялся для диагностики мощных импульсных ионных пучков [180], высокоэнергетических [181] и низкоэнергетических сильноточных электронных пучков [182, 183]. Тепловизионные измерения проводились аналогично методике [182]. Для целей измерений анод выполнялся из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Тыльная сторона анода покрывалась черной матовой краской, что обеспечивало коэффициент излучения около 0.95. Тепловое излучение выводилось через окно из флюорита кальция и регистрировалось тепловизором TESTO 875-1. Пауза между импульсом пучка и фиксацией термограммы составляла около 1 с. Это время было необходимо для распространения и выравнивания тепла по всей глубине мишени. Пространственное разрешение метода, определявшееся расплыванием теплового поля в течение времени 1 с, составляло около 2 мм.

Пример термограммы анода и рассчитанное распределение плотности энергии, выделенной на аноде за импульс, для варианта ЛТД с шестью ступенями показаны на рисунке 7.18.

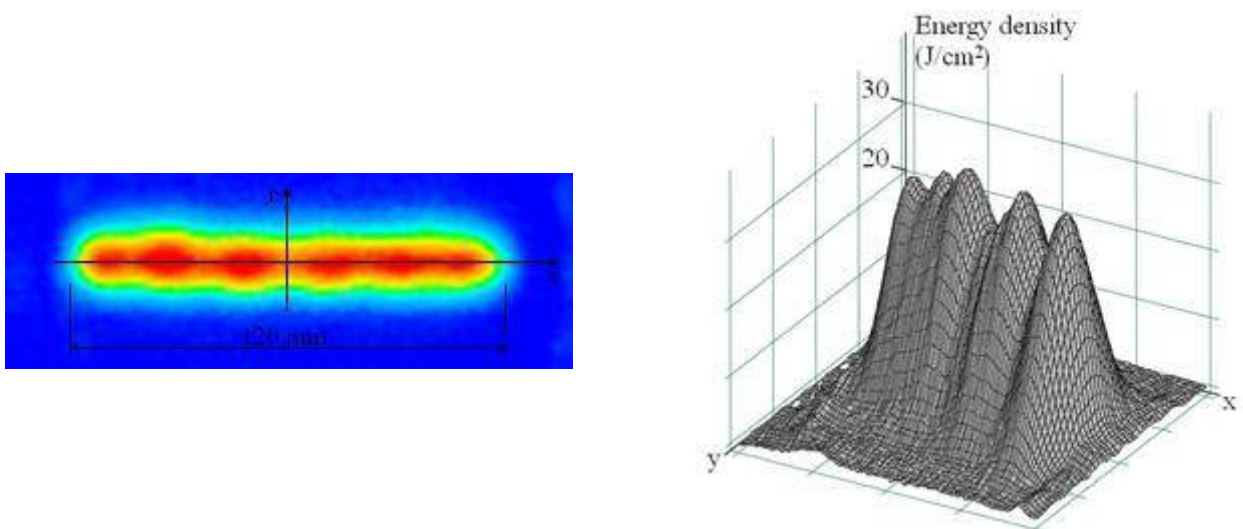


Рисунок 7.18 – Термограмма анода и распределение плотности энергии на аноде при использовании ЛТД генератора с шестью ступенями

На рисунке 7.19 приведены распределения плотности энергии в продольном ( $x$ ) и поперечном ( $y$ ) направлениях. Кривые 1 соответствуют случаю работы при отсутствии предымпульса, кривые 2 – при наличии предымпульса. Предымпульс приводит к уширению пучка в поперечном направлении. В продольном направлении значительных отличий в распределении плотности энергии на аноде не наблюдается.

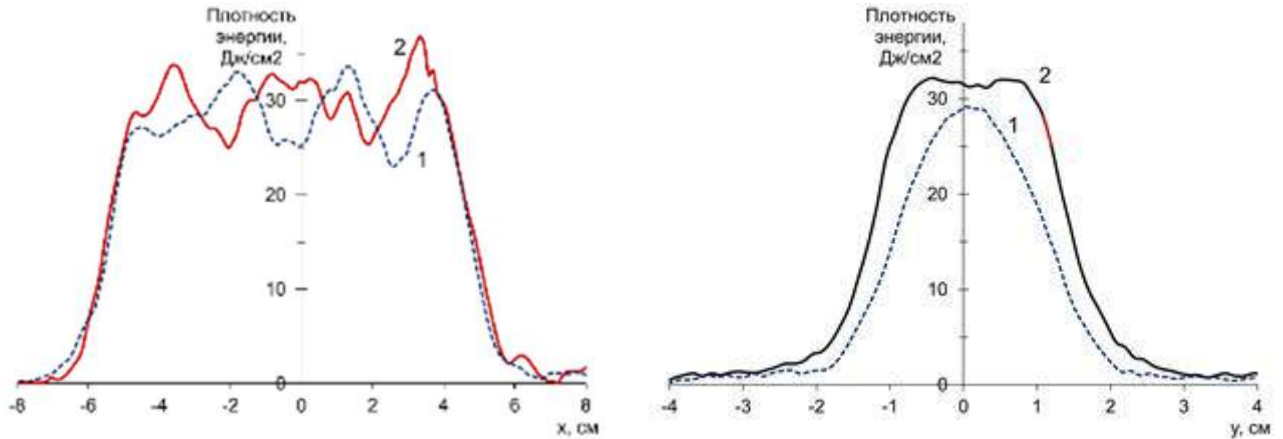


Рисунок 7.19 – Распределение плотности энергии в продольном ( $x$ ) и поперечном ( $y$ ) направлениях при использовании ЛТД генератора с шестью ступенями: 1 – без предымпульса (анод-катодный зазор в диоде 10 мм), 2 – с предымпульсом (анод-катодный зазор в диоде 13 мм)

В диоде с лезвийным катодом при уровне напряжения 100–300 кВ плотность пучка электронов на аноде неравномерна и зависит от числа возникших взрывоэмиссионных центров и сложения потоков частиц из этих центров [184]. Из-за расплывания теплового поля в течение паузы между импульсом пучка и фиксацией термограммы, неоднородности плотности с масштабом  $\sim 1$  мм и менее на изображении сглажены.

Интегрирование распределения плотности энергии по площади позволяет получить значение полной энергии, выделенной на аноде, из данных тепловизионных измерений. Сопоставление этих данных с величинами энергии из осциллографических измерений показывает, что тепловизионные измерения дают значения, заниженные на 25–30 %. Основная причина расхождения измерений связана с уносом энергии в результате абляции мишени под действием электронного пучка. Доля уносимой энергии сильно зависит от плотности энергии в пучке. Так тепловые расчёты [182] показывают, что при плотности энергии 10 Дж/см<sup>2</sup> доля энергии, уносимой из мишени парами, составляет около 2 % от падающей энергии, а при 15 Дж/см<sup>2</sup> уже 11 %. Таким образом, в

условиях описываемых экспериментов тепловизионные измерения дают скорее качественную, нежели количественную оценку плотности энергии.

При работе с двумя ЛТД ступенями были получены аналогичные закономерности влияния предимпульса на распределение плотности энергии пучка на аноде.

## 7.6 Электронный источник с плазмонаполненным диодом

### 7.6.1 Схема источника с плазмонаполненным диодом

Схема электронного источника на основе ЛТД генератора и плазмонаполненного диода показана на рисунке 7.20. Энергия к диоду подводится по вакуумной коаксиальной линии (1). На конце линии установлен полый цилиндрический катод (2), внутри которого размещается источник плазмы. Питание к источнику плазмы подводится от отдельного генератора  $C_1$  по проводнику (3) внутри центрального проводника вакуумного коаксиала. Объем выходной коаксиальной линии и диода откачивался с помощью турбомолекулярного насоса. Давление остаточного газа перед включением источника плазмы составляло  $\approx 5 \cdot 10^{-5}$  Торр.

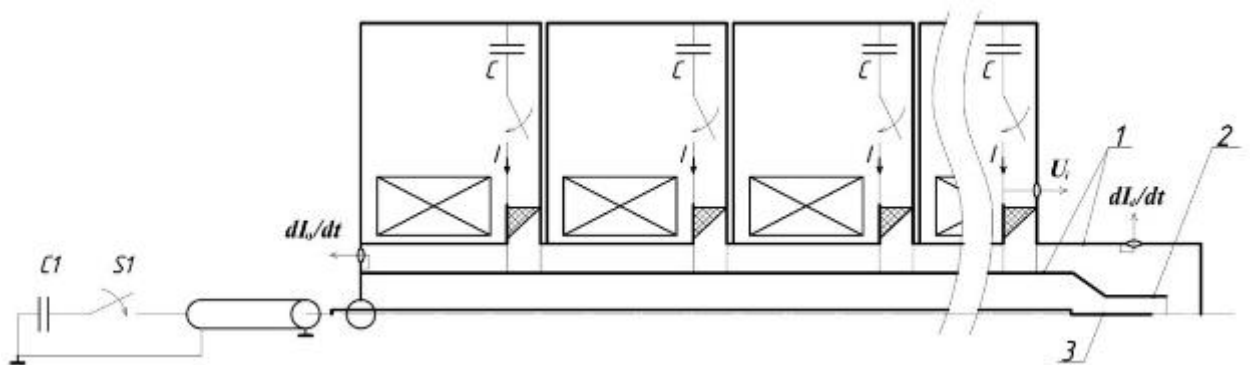


Рисунок 7.20 – Схема электронного источника на основе ЛТД генератора и плазмонаполненного диода: 1 – вакуумная коаксиальная линия; 2 – электрод источника плазмы и потенциальный (катодный) электрод диода; 3 – потенциальный электрод источника плазмы

Отличительной особенностью плазмонаполненного диода является способность работать как прерыватель тока, увеличивая выходную мощность питающего ЛТД генератора за счет повышения напряжения. Результаты исследований плазменных прерывателей тока демонстрируют, что их сопротивление в высокоомной фазе повышается с увеличением напряженности магнитного поля на катоде [185–187]. В связи с этим, для усиления магнитного поля при заданном токе и реализации высокой



мощности в электронном пучке использовалась геометрия плазмонаполненного диода с цилиндрическим катодом малого диаметра, около 10 мм. Эскиз плазмонаполненного диода показан на рисунке 7.21. В качестве источника плазмы в диоде применялась плазменная пушка коаксиального типа, как наиболее простое и эффективное устройство, обеспечивающее формирование плазменного канала с относительно небольшим радиальным размером [188, 189]. Диаметр канала разряда в пушке около 0.4 мм. Материал диэлектрика – силиконовая резина. Выбор материала, с одной стороны, обусловлен разработанной технологией изготовления канала разряда малого диаметра. С другой стороны, силиконовая резина обладает высокой термостойкостью и пластичностью.

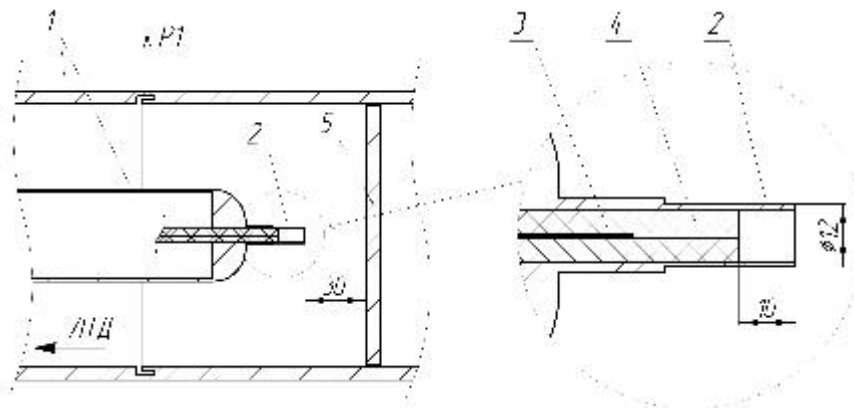


Рисунок 7.21 – Плазмонаполненный диод: 1 – вакуумная коаксиальная линия ЛТД генератора; 2 – наружный электрод плазменной пушки и потенциальный электрод диода; 3 – внутренний электрод плазменной пушки; 4 – диэлектрик с каналом разряда; 5 – анодный электрод диода. P1 – индуктивный датчик тока в диоде

Основной цикл работ выполнен на ЛТД генераторе с шестью ступенями (подразделе 5.3) и представлен в работах [190–195].

#### 7.6.2 Параметры электронного источника с плазмонаполненным диодом

Разряд ЛТД генератора с шестью ступенями на плазмонаполненный диод иллюстрирует рисунок 7.22. На осциллограмме тока можно выделить две фазы. Первая фаза – низкоомная, когда сопротивление диода существенно ниже волнового сопротивления контура генератора, падение напряжения на диодном промежутке мало, а ток в диоде близок к току короткого замыкания. Вторая фаза – высокоомная, когда сопротивление диода соизмеримо с волновым сопротивлением контура или превышает его, скорость нарастания тока снижается и происходит обрыв тока. При времени

формирования плазменного канала до запуска ЛТД генератора  $t_d=1.5$  мкс в низкоомной фазе в диоде реализуется ток  $I_d$  амплитудой более 100 кА, а в высокоомной фазе сопротивление диода нарастает до амплитудного значения по закону близкому к линейному со скоростью  $k \approx 0.5$  Ом/нс и формируется импульс напряжения  $U_d$  амплитудой более 1 МВ. Пиковая мощность в диоде  $W_d \approx 100$  ГВт более чем вдвое превышает мощность ЛТД генератора при разряде на «согласованную» нагрузку. В высокоомной фазе в диоде рассеивается энергия  $E_d \approx 5$  кДж. Эффективность передачи энергии из емкостного накопителя ЛТД генератора в плазмонаполненный диод составляет более 60 %.

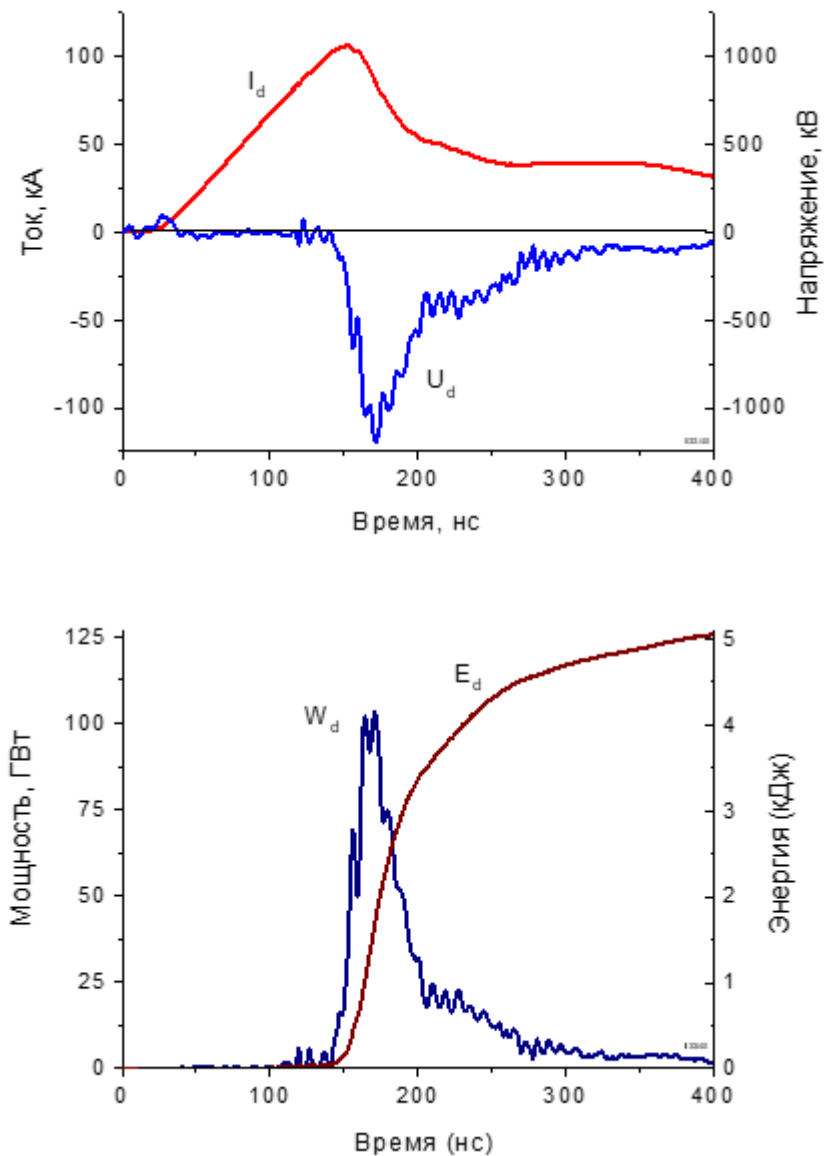


Рисунок 7.22 – Осциллограммы тока  $I_d$ , напряжения  $U_d$ , мощности  $W_d$  и энергии  $E_d$  при разряде ЛТД генератора на плазмонаполненный диод. Зарядное напряжение ЛТД ступеней 90 кВ

В высокоомной фазе в диоде формируется электронный пучок диаметром около 1 см (рисунок 7.23) со средней плотностью мощности на аноде  $\sim 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> [195]. Мощность тормозного рентгеновского излучения на расстоянии 1 м за анодом из тантала толщиной 300 мкм составляет около  $0.4 \cdot 10^8$  Р/с, доза излучения за импульс  $\sim 1$  Р.

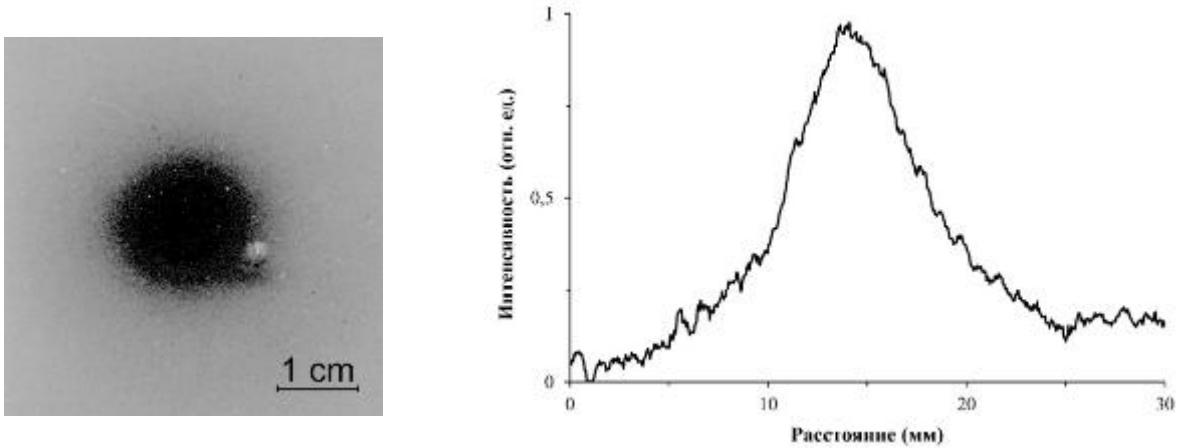


Рисунок 7.23 – Рентгеновский снимок анода и интенсивность почернения поперек пятна

Для оценки воспроизводимости параметров набрана статистика из 70 импульсов при фиксированном времени задержки, соответствующем режиму с максимальной мощностью. В серии из 70 импульсов при фиксированном времени  $t_d=1.5$  мкс получено среднее значение амплитуды тока в диоде и среднеквадратичное отклонение  $110 \pm 10$  кА. Среднее значение амплитуды генерируемого напряжения в диоде и среднеквадратичное отклонение  $1 \pm 0.25$  МВ. Среднее квадратичное отклонение амплитуды тока от среднего значения не превышает 15 %, а амплитуды напряжения 25 %.

Мегавольтный уровень генерируемого импульса напряжения был подтвержден дублирующим способом, основанном на измерении волны тока во включенной параллельно диоду короткозамкнутой вакуумной линии с начальным током подмагничивания [196, 197]. Магнитное поле тока подмагничивания обеспечивает магнитную изоляцию электронов и сильное прижатие электронного слоя к катоду уже на фронте падающей волны напряжения и, следовательно, квазипостоянный импеданс линии. Показано, что в качестве импеданса и электрической длины такой линии можно с погрешностью на уровне 10% принимать параметры вакуумной линии в отсутствие эмиссионного электронного слоя. Способ апробирован в экспериментах при уровне напряжения до 2 МВ.

Формирование электронного пучка большого поперечного сечения в представленном диоде затрудняет фокусирующее действие собственного магнитного

поля тока пучка. Для генерации электронного пучка с площадью поперечного сечения около  $50 \text{ см}^2$  был предложен и реализован секционированный плазмонаполненный диод [181]. В диоде с шестью секциями реализовано напряжение 400 кВ при токе 100 кА. Средняя плотность тока на аноде составила  $\sim 1 \text{ кА/см}^2$ , плотность энергии  $\sim 10 \text{ Дж/см}^2$ . Экспериментально показана возможность эффективной транспортировки электронного пучка на расстояние в десятки сантиметров в плазмонаполненном диоде без разделительной фольги (сетки) между областями генерации и транспортировки пучка, что позволяет размещать мишень на удаленном расстоянии от зоны формирования пучка. В результате исключаются локальные пики плотности тока и энергии на мишени, связанные с прикатодными эффектами, секционированием или дуговой стадией разряда в диоде.

### 7.6.3 Увеличение напряжения и мощности электронного источника на основе ЛТД генератора и плазмонаполненного диода

Схема построения ЛТД генераторов позволяет проводить масштабирование по току и индуктивности, сохраняя характерное время ввода тока в индуктивность разрядного контура. Поэтому вопрос увеличения напряжения и мощности источника с плазмонаполненным диодом может вполне решаться лишь за счет параметров ЛТД генератора без изменения конструкции диода и параметров предварительно создаваемого плазменного канала.

Подход к увеличению напряжения и мощности следует из анализа упрощенной электрической схемы в высокоомной фазе плазмонаполненного диода, состоящей из последовательно включенных сопротивления диода  $R(t)$  и индуктивности контура  $L$  с начальным током  $I_0$ . Для линейно нарастающего сопротивления диода  $R(t) = kt$  выходные параметры контура определяются следующими выражениями [193]. Ток в контуре

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{kt^2}{2L}\right). \quad (7.1)$$

Напряжение на диоде  $U(t) = I(t)R(t)$  в момент времени  $t_m = \sqrt{L/k}$  достигает амплитудного значения

$$U_m = I_0 \sqrt{\frac{kL}{e}} \sim \sqrt{E_0} \sqrt{k}, \quad (7.2)$$

где  $e$  – основание натурального логарифма,  $E_0 = \frac{LI_0^2}{2}$  – запасаемая энергия в индуктивности контура.

Пиковая мощность рассеивания энергии в диоде

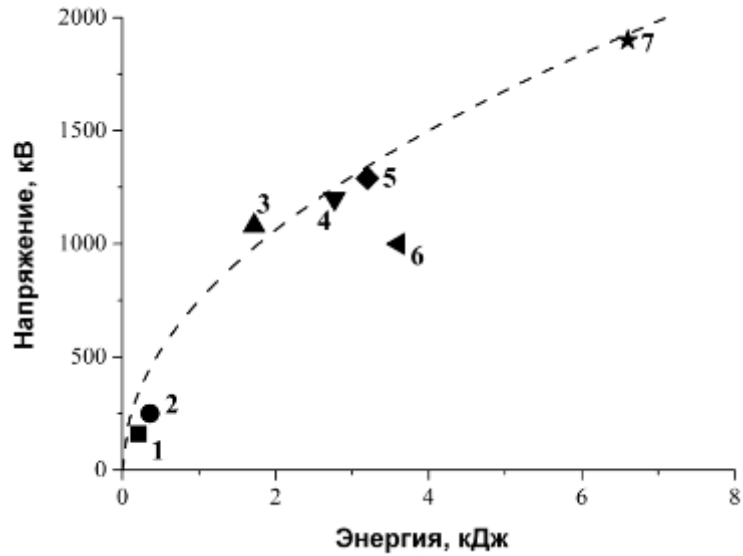
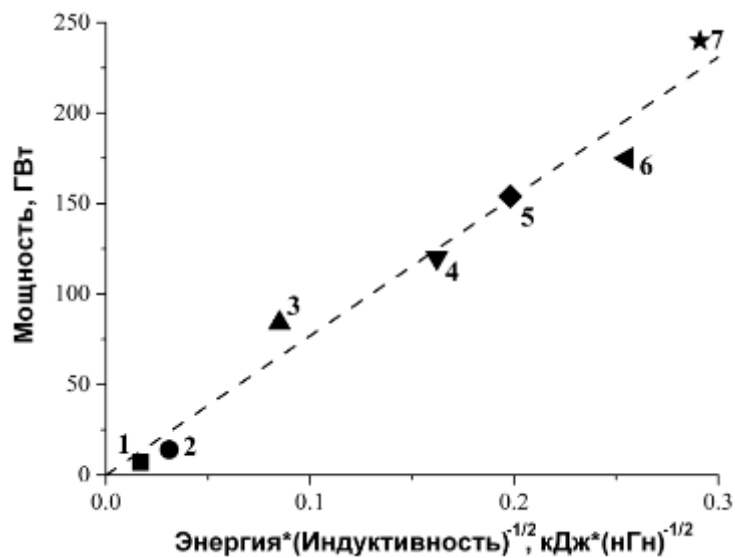
$$W_m = I_0^2 \sqrt{\frac{kL}{2e}} \sim E_0 \sqrt{\frac{k}{L}} \quad (7.3)$$

достигается в момент времени  $t_m = \sqrt{L/2k}$ . Заметим, что выражение (7.3) справедливо лишь в случае, когда время нарастания сопротивления диода превышает длительность фронта генерируемого напряжения. В соответствии с (7.3), задача увеличения напряжения и мощности может быть решена за счет увеличения запасаемой энергии в индуктивности контура  $E_0 = \frac{LI_0^2}{2}$  при условии сохранения скорости нарастания сопротивления диода  $k$ .

Возможность увеличения мощности плазмонаполненного диода только за счет параметров питающего генератора без изменения параметров создаваемого плазменного канала была экспериментально показана в работах [199–201]. В этих исследованиях изменялась энергия, запасаемая в индуктивности контура генератора, от 0.2 кДж до 7 кДж за счет увеличения амплитуды тока от 50 кА до 160 кА и индуктивности контура от 140 нГн до 550 нГн. При этом время ввода тока в индуктивность сохранялось на уровне 100 нс. Параметры контура генератора для семи режимов с разной запасаемой магнитной энергией приведены в таблице 7.3. Параметры плазмонаполненного диода для указанных режимов обобщены в виде зависимостей напряжения на диоде  $U_d$  от запасаемой магнитной энергии  $E_0$  (рисунок 7.24) и мощности диода  $W_d$  от отношения запасаемой энергии к индуктивности контура  $E_0/(L)^{1/2}$  (рисунок 7.25). Помимо экспериментальных данных на рисунках также приведены графики аналитических функций (7.2) и (7.3) (пунктирные линии). Видно, что зависимости (7.2) и (7.3) удовлетворительно аппроксимируют экспериментальные результаты. При увеличении запасаемой в индуктивности контура энергии до 7 кДж было получено сохранение скорости нарастания сопротивления диода на уровне  $k \sim 0.5$  Ом/нс, что позволило реализовать в плазмонаполненном диоде напряжение 1.9 МВ и пиковую мощность 250 ГВт (рисунок 7.26).

Таблица 7.3 – Параметры контура генератора

Режим	Индуктивность контура, нГн	Средняя скорость нарастания тока, кА/нс	Амплитуда тока, кА	Энергия в индуктивности контура, кДж
1	140	0.4	53	0.2
2	135	0.5	76	0.4
3	410	0.8	90	1.7
4	350	1.0	126	2.8
5	260	1.6	156	3.2
6	200	1.9	190	3.6
7	550	1.5	150	7

Рисунок 7.24 – Экспериментальные значения напряжения на диоде  $U_d$  в зависимости от запасаемой энергии  $W_0$ . Пунктирная линия – расчетная кривая  $U_d = \text{const} \times (W_0)^{1/2}$ Рисунок 7.25 – Экспериментальные значения пиковой мощности диода  $W_d$  в зависимости от отношения запасаемой энергии к индуктивности контура  $E_0/(L)^{0.5}$ . Пунктирная линия – расчетная кривая  $W_d = \text{const} \times E_0/(L)^{1/2}$

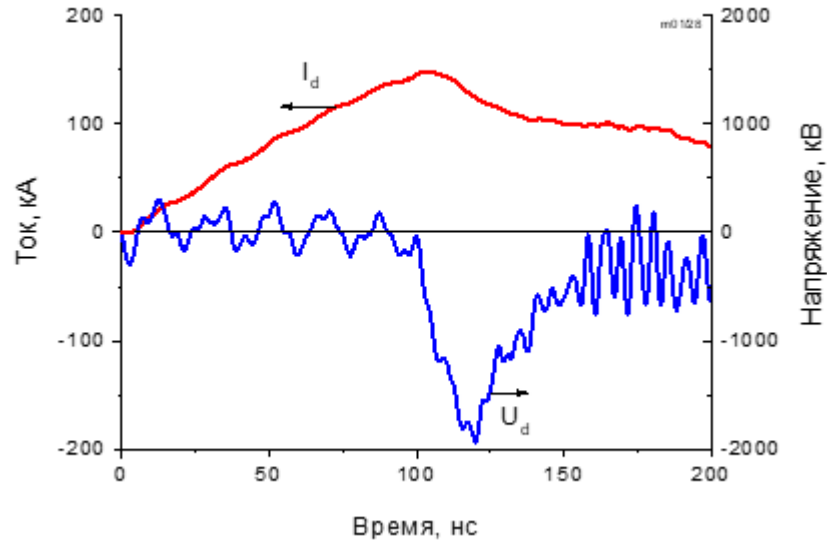


Рисунок 7.26 – Осциллограммы тока  $I_d$  и напряжения  $U_d$  плазмонаполненного диода

## 7.7 Выводы

На основе разработанных секций создан ряд генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления. При уровне запасаемой энергии в емкостном накопителе порядка  $10^3$ – $10^4$  Дж пиковая мощность генераторов составляет порядка  $10^{10}$ – $10^{11}$  Вт, а характерное время вывода энергии из первичного емкостного накопителя в нагрузку – порядка  $10^{-7}$  с. Практическая ценность генераторов заключается в том, что они несут все преимущества использования ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления, а именно простоту конструкции и обслуживания, надежность и компактность.

Созданные генераторы с воздушной изоляцией по совокупности параметров являются конкурентоспособным инструментом для научных исследований и практических применений.

Реализованы компактные источники сильноточного электронного пучка субмикросекундной длительности на основе ЛТД генератора с диодом со взрывоэмиссионным катодом и вспомогательным разрядом на потенциальном электроде. Для питания вспомогательного разряда используются специальные секции емкостного накопителя внутри ЛТД ступеней, либо отдельный генератор. При токе в диоде около 150 кА выходное напряжение источника может достигать 1.9 МВ, пиковая мощность – 250 ГВт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная во второй половине 90-х годов прошлого века академиком Б.М. Ковальчуком оригинальная конструкция генератора индукционного типа послужила началом развития в ИСЭ СО РАН, а затем и за рубежом новой технологии построения мощных импульсных генераторов (ЛТД генераторов). В диссертационной работе данный подход развит применительно к ЛТД генераторам, в которых в качестве изоляции емкостного накопителя и рабочей среды разрядников используется воздух атмосферного давления. Результаты исследований и разработок, составляющих основу диссертации, обобщены в виде следующих выводов:

1 Созданы секции из параллельно включенных конденсаторов и семизазорного шестиканального искрового разрядника в едином корпусе из компаунда на основе эпоксидной смолы. Максимальное зарядное напряжение конденсаторов секций составляет 100 кВ при условии их эксплуатации в масле. Корпус из эпоксидного компаунда в созданных секциях усиливает внешнюю изоляцию конденсаторов и делает возможным их эксплуатацию в воздухе атмосферного давления при зарядном напряжении 100 кВ. При этом рабочей средой разрядника также является воздух атмосферного давления.

При суммарной емкости конденсаторов 160 нФ пиковая мощность секции  $W$  достигает 2.6 ГВт на нагрузке около 1 Ом, амплитуда тока разряда  $I_m$  составляет около 50 кА, фронт импульса по уровню 0.1–0.9 от амплитудного значения  $t_{1-9} \approx 65$  нс; при емкости конденсаторов секции 80 нФ:  $W \approx 2.2$  ГВт на нагрузке около 1.7 Ом,  $I_m \approx 35$  кА,  $t_{1-9} \approx 45$  нс; при емкости конденсаторов секции 16 нФ:  $W \approx 1.1$  ГВт на нагрузке около 2 Ом,  $I_m \approx 20$  кА,  $t_{1-9} \approx 25$  нс.

Временная постоянная секции с изоляцией воздухом атмосферного давления не превышает временной постоянной секций ЛТД ступеней с масляной изоляцией.

Конденсаторы в жестком корпусе из эпоксидного компаунде способны обеспечивать до  $10^5$  включений при зарядном напряжении 90–95 кВ в режиме разряда с реверсом 10 % и амплитуде тока через конденсатор 12 кА. Экспериментально подтверждена работоспособность разрядника без обслуживания в течение всего ресурса конденсаторов секции.



При скорости нарастания пускового импульса напряжения около 3 кВ/нс и зарядном напряжении 80–100 кВ реализована наносекундная точность включения секций с джиттером менее 3 нс.

2 Созданы несколько вариантов ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления и максимальным зарядным напряжением 100 кВ. В ступенях реализовано основное достоинство подхода, связанного с использованием воздуха в качестве изоляции: возможность проведения профилактики и ремонта емкостного накопителя без полной разборки ступени, что критически важно в крупных установках, где используются модули в составе многих последовательно включенных ЛТД ступеней.

Впервые создана ЛТД ступень с воздушной изоляцией с мегаамперным уровнем импульса тока и временем нарастания по уровню 0.1-0.9 менее 100 нс. Пиковая мощность ступени на нагрузке 0.05 Ом составляет около 35 ГВт, характерное время вывода энергии в нагрузку – 165 нс.

Создана самая мощная и энергоемкая ЛТД ступень с воздушной изоляцией. Ступень позволяет получить в нагрузке 0.04 Ом импульс тока амплитудой около 1 МА с фронтом (по уровню 0.1–0.9) 160 нс. В емкостном накопителе ступени запасается энергия 17.3 кДж при зарядном напряжении 95 кВ, в нагрузку выводится более 70 % запасенной энергии с пиковой мощностью 40 ГВт за характерное время 300 нс.

3 Создан импульсный генератор в составе двух модулей, каждый из которых включает двенадцать ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления. При зарядном напряжении ЛТД ступеней 95 кВ генератор обеспечивает ускоряющее напряжение до 600 кВ и ток в диоде около 230 кА при длительности импульса 150 нс на половине амплитуды. Пиковая мощность в диоде достигает 130 ГВт. Энергия в пучке при уровне мощности не менее половины от максимальной составляет около 20 кДж из запасаемых в емкостном накопителе 34.6 кДж. Генератор лег в основу созданной в ИСЭ СО РАН уникальной мультитераваттной фемтосекундной лазерной системы видимого диапазона THL-100.

Создание генератора демонстрирует прогресс в снижении длительности на полувывсоте генерируемого импульса на диоде с 700 нс до 250 нс, что позволило сохранить пиковую мощность электронного пучка на уровне 100 ГВт при снижении

энергии, запасаемой в емкостном накопителе энергии, в 2.8 раза по сравнению с ранее созданным генератором для прямой накачки газового лазера.

Разработан проект импульсного генератора в составе двух модулей, каждый из которых включает 12 ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления, с запасаемой энергией до 190 кДж и пиковой выходной мощностью 700 ГВт для возбуждения газовой активной среды объемом 600 литров.

4 Впервые создан модуль из пяти мегаамперных ЛТД ступеней, использующих воздух в качестве изоляции. В модуле сохранено преимущество использования воздуха в качестве изоляции: возможность проведения профилактических и ремонтных работ емкостного накопителя ЛТД ступеней без разборки модуля. Максимальная выходная мощность модуля реализуется на нагрузке около 0.25 Ом и составляет 190 ГВт при зарядном напряжении ступеней 90 кВ. В модуле реализовано увеличение выходной мощности кратно числу ЛТД ступеней за счет увеличения напряжения при сохранении амплитуды тока, фронта импульса и характерного времени вывода энергии в нагрузку.

5 Создан ряд мощных генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления. При уровне запасаемой энергии в емкостном накопителе  $10^3$ – $10^4$  Дж пиковая мощность генераторов составляет  $10^{10}$ – $10^{11}$  Вт, а характерное время вывода энергии из первичного емкостного накопителя в нагрузку – порядка  $10^{-7}$  с. Практическая ценность генераторов заключается в том, что они несут в себе все преимущества использования ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления: простоту конструкции и обслуживания, надежность и компактность.

Созданные генераторы с воздушной изоляцией по совокупности параметров являются конкурентоспособным инструментом для научных исследований и привлекательны для практических применений.

Реализованы компактные источники сильнооточного электронного пучка субмикросекундной длительности на основе ЛТД генератора с изоляцией воздухом атмосферного давления и диода со взрывоэмиссионным катодом и вспомогательным разрядом на потенциальном электроде. Для питания вспомогательного разряда используются специальные секции емкостного накопителя внутри ЛТД ступеней, либо отдельный генератор. При токе в диоде около 150 кА выходное напряжение источника может достигать 1.9 МВ, пиковая мощность – 250 ГВт.

Результаты исследований автора, относящихся к теме диссертации, изложены в следующих работах: [54, 109–112, 115, 116, 123, 124, 135–139, 148–151, 157–161, 164–168, 176, 183–192, 194–196].

Полученные в ходе выполнения работы результаты могут служить практическими рекомендациями при проектировании и разработке мощных импульсных генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления для исследовательских и прикладных целей.

Перспективы дальнейшей разработки представленной тематики заключаются в создании сверхмощных установок с уровнем тока порядка  $10^7 - 10^8$  А без использования трансформаторного масла; в разработке ЛТД генераторов с длительностью импульса менее 100 нс для целей импульсной рентгенографии; в проработке вариантов исполнения ЛТД генераторов с импульсно-периодическим режимом работы.

Автор отдает долг признательности и благодарности своему руководителю и учителю академику Б.М. Ковальчуку, без которого данная работа была бы невозможна, а также д.т.н. А.А. Киму за помощь и поддержку на стадии обсуждения и подготовки диссертационной работы. Автор благодарен всем сотрудникам отдела импульсной техники ИСЭ СО РАН за помощь, плодотворное сотрудничество и участие в работах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bernstein, B. AURORA an electron accelerator / B. Bernstein, I. Smith // IEEE Trans. on Nuclear Sci. – 1973. – 20(3). – P.294-300.
2. Sincerny P. Performance of Double-EAGLE / P. Sincerny, D. Strachan, G. Frazier, C. Gilman, H. Helava, S. Wong, J. Banister, T. DaSilva, S.K. Lam, D. LePell, J. Levine, R. Rodenburg, T. Sheridan // Proc. 5<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Arlington, USA. –1997. – P.151-154.
3. 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, K.W. Struve, M. Mostrom, I. Smith, P. Spence, P. Corcoran // Proc. 11<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Baltimore, USA. –1997. – P.709-714.
4. Bloomquist, D.D. SATURN, a large area x-ray simulation accelerator / D.D. Bloomquist, R.M. Stinnett, D.H. McDaniel, J.R. Lee, A.W. Sharpe, J.A. Halbleib, L.G. Shlitt, P.W. Spence, P. Corcoran // Proc. 6<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Arlington, USA. – 1987. – P.310-317.
5. Smirnov, V.P. Progress in investigations on a dense plasma compression on “ANGARA-5-1” / V.P. Smirnov, E.V. Grabovskii, V.I. Zaytsev, S.V. Sakharov, S.L. Nedoseev, V.Ya. Tsarfin, I.R. Yampolskii // Proc. 8<sup>th</sup> Intern. Conference on High-Power Particle Beams, Novosibirsk, Russia. – 1990. – P.61-78.
6. Альби́ков, З.А. Экспериментальный 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. Латманисова, 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. – 68(1). – С.26-35.
7. Deng, J. From concept to reality – A review to the primary test stand and its preliminary application in high energy density physics / Jianjun Deng, Weiping Xie, Shuping Feng, Meng Wang, Hongtao Li, Shengyi Song, Minghe Xia, Ji Ce, An He, Qing Tian, Yuanchao

- Gu, Yongchao Guan, Bin Wei, Xianbin Huang, Xiaodong Ren, Jiakun Dan, Jing Li, Shaotong Zhou, Hongchun Cai, Siqun Zhang, Kunlun Wang, Qiang Xu, Yujuan Wang, Zhaohui Zhang, Guilin Wang, Shuai Guo, Yi He, Yiwei Zhou, Zhanji Zhang, Libing Yang, Wenkang Zou // *Matter and Radiation at Extremes*. – 2016. – 1 – P.48-58.
8. Павловский А.И. Мощный линейный импульсный ускоритель пучка электронов на радиальных линиях ЛИУ-30 / А.И. Павловский, В.С. Босамыкин, А.И. Герасимов, В.А. Тананакин, А.С. Федоткин, К.А. Морунов, В.Ф. Басманов, Г.М. Скрипка, А.Д. Тарасов, В.С. Гордеев, А.В. Гришин, В.Я. Анфиногенов, В.П. Грицына, В.Я. Аверченков, С.А. Лазарев, В.С. Горкунов, В.П. Веросов, А.С. Кошелев, Ю.М. Одинцов // *ПТЭ* – 1998. – № 2 – С.13-25.
  9. Завьялов Н.В. 30-летие эксплуатации ускорителя ЛИУ-30 / Н.В. Завьялов, В.С. Гордеев, В.Ф. Басманов, С.А. Картанов, С.Л. Глушков, В.П. Грицына, А.В. Грунин, С.А. Лазарев, М.Г. Балябин, А.А. Васюнин, А.Д. Воронова, О.В. Зверев, А.В. Каргин, А.Н. Ляднов, А.В. Жильцов, О.В. Забелин, С.Т. Назаренко, Д.В. Репин, Б.И. Модель, Е.Н. Крылевский // *Труды XIII межотраслевой конференции по радиационной стойкости ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»*, Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – 2024. – С.236-246.
  10. Завьялов Н.В. Проект электрофизической установки «Гамма-4» / Н.В. Завьялов, В.С. Гордеев, В.Т. Пунин, А.В. Гришин, С.Т. Назаренко, В.С. Павлов, В.А. Деманов, Т.Ф. Шиханова, Д.А. Калашников, А.В. Козачек, С.Л. Глушков, К.В. Страбыкин, С.Ю. Пучагин, Д.О. Мансуров, Б.П. Миронычев, Р.А. Майоров, В.Л. Майорникова // *Изв. вузов. Физика*. – 2014. – 57(12/2) – С.176-179.
  11. Завьялов Н.В. Проект электрофизической установки «Гамма-4» / Н.В. Завьялов, В.С. Гордеев, В.Т. Пунин, А.В. Гришин, С.Т. Назаренко, В.С. Павлов, В.А. Деманов, Т.Ф. Шиханова, Д.А. Калашников, А.В. Козачек, С.Л. Глушков, К.В. Страбыкин, С.Ю. Пучагин, Д.О. Мансуров, Б.П. Миронычев, Р.А. Майоров, В.Л. Майорникова // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2015. – 56(1) – С.64-71.
  12. Будников Д.В. Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ-ВНИИЭФ: настоящее и будущее / Д.В. Будников, С.В. Воронцов, С.Л. Глушков, В.С. Гордеев, В.Б. Гречушкин, А.А. Девяткин, Н.В. Завьялов, А.А. Кайгородов, С.А. Картанов, В.Ф. Колесов, С.Т. Назаренко, А.В. Панин, А.А. Пикулев, К.Г. Плужян,

- М.Л. Сметанин, К. В. Страбыкин, А. В. Тельнов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2021. – № 4. – С.5-25.
13. Bugaev S.P. A terawatt pulse-power generator with a microsecond plasma-opening switch / S.P. Bugaev, A.M. Volkov, A.M. Iskoldsky, A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, G.A. Mesyats, A.A. Novikov, V.P. Yakovlev // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1990. – 18(1). – P.115-118.
  14. Бугаев, С.П. ГИТ-16: мегаджоульный импульсный генератор с плазменным ключом для нагрузок типа Z-пинча / С.П. Бугаев, А.М. Волков, А.А. Ким, В.Н. Киселев, Б.М. Ковальчук, Н.Ф. Ковшаров, В.А. Кокшенев, Н.Е. Курмаев, С.В. Логинов, Г.А. Месяц, Ф.И. Фурсов, А.П. Хузеев // Изв. ВУЗов. Физика. – 1997. – №12. – С.38-46.
  15. Goodrich, P.J. High power opening switch operation on HAWK / P.J. Goodrich, D.P. Hinshelwood, R.J. Commisso, J.M. Grossmann, J.C. Kellogg, B.V. Weber // Proc. 9<sup>th</sup> Intern. IEEE Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA. – 1993. – P.511-515.
  16. Rix, W. Status of the ACE-4 inductive storage technology, 6 MA driver / W. Rix, A. Miller, D. Husovsky, J. Thompson, E. Waigman // Proc. 9<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA. – 1993. – P.115-118.
  17. Rix, W. Final design and initial pulsed power results for the Decade Quad plasma radiation source machine configuration / W. Rix, B. Altes, K. Childers, P. Corcoran, M. Danforth, P. Spence, P. Sincerny, T. Tucker, J. Douglas, M. Babineau, V. Kenyon, L. Christensen, G.L. Whitehead, P. Kurucz, K. Ware, J.K. Brandon // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA. – 2001. – P.573-576.
  18. Smith, P. Pulse power for future and past X-ray simulators / I. Smith, P. Corcoran, A.R. Miller, V. Carboni, P. Sincerny, P. Spence, C. Gilbert, W. Rix, E. Waisman, L. Schlitt, D. Bell // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2002. – 30(5). – P.1746-1754.
  19. Lam, S.K. Fast discharge energy storage development for advanced X-ray simulators / S.K. Lam, A.R. Miller, L.L. Sanders, P. Sincerny, T. Tucker // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2005. – 33(2). – P.982-989.
  20. Stygar, W. Conceptual design of a 960-TW accelerator powered by impedance-matched Marx generators / W. Stygar, K. Austin, T. Awe, J. Bailey, E. Breden, G. Brent, J. Calhoun, M. Campbell, R. Clark, R. Cooper, M. Cuneo, J. Edwards, J. Ennis, R. Gilgenbach, M. Gomez, P. Gourdain, G. Greiser, F. Gruner, J. Hammer, M. Herrmann,

- M. Hess, B. Hutsel, C. Jennings, D. Jobe, O. Johns, B. Jones, M. Jones, P. Jones, K. Keilholtz, P. Knapp, G. Laity, D. Lamppa, K. LeChien, J. Leckbee, S. Lewis, D. Lucero, M. Martin, K. Matzen, M. Mazarakis, R. McBride, R. McKee, J. Moore, C. Mostrom, T. Mulville, D. Muron, K. Peterson, D. Pilkington, J. Porter, K. Raman, G. Rochau, D. Rose, M. Savage, M. Sceiford, P. Schmit, R. Schneider, D. Sinars, S. Slutz, R. Spielman, B. Stoltzfus, C. Verdon, R. Vesey, E. Waisman, E. Weinbrecht, D. Welch, M. Wisher // Proc. 21<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Brighton, UK. – 2017. – DOI: 10.1109/PPC.2017.8291256
21. Stygar, W.A. Impedance-matched Marx generators / W.A. Stygar, K.R. LeChien, M.G. Mazarakis, M.E. Savage, B.S. Stoltzfus, K.N. Austin, E.W. Breden, M.E. Cuneo, B.T. Hutsel, S.A. Lewis, G.R. McKee, J.K. Moore, T.D. Mulville, D.J. Muron, D.B. Reisman, M.E. Sceiford, M.L. Wisher // Phys. Rev. ST Accel. Beams. – 2017. – V.20. – 040402. – P1-16.
  22. Guegan, B. Mega-volt impedance-matched Marx / B. Guegan, F. Bayol, D. Arnal, P. Mouly // Proc. 23<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf. USA. – 2021. – DOI: 10.1109/PPC40517.2021.9733131.
  23. Bostrikov, A.N. Primary energy storages based on linear transformer stages / A.N. Bostrikov, V.A. Vizir, S.N. Volkov, V.G. Durakov, A.M. Efremov, V.B. Zorin, A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, E.V. Kumpjak, S.V. Loginov, V.A. Sinebryuhov, N.V. Tsou, V.V. Chervjakov, V.P. Yakovlev, G.A. Mesyats // Laser and Particle Beams. – 2003. – 21(2). – P.295-299.
  24. Kim, A.A. The story of the LTD development / A.A. Kim, M.G. Mazarakis // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2020. – 48(4). – P.749-756.
  25. Stygar, W.A. Theoretical z-pinch scaling relations for thermonuclear-fusion experiments / W.A. Stygar, M.E. Cuneo, R.A. Vesey, H.C. Ives, M.G. Mazarakis, G.A. Chandler, D.L. Fehl, R.J. Leeper, M. K. Matzen, D.H. McDaniel, J.S. McGurn, J.L. McKenney, D.J. Muron, C.L. Olson, J.L. Porter, J.J. Ramirez, J.F. Seamen, C.S. Speas, R.B. Spielman, K.W. Struve, J.A. Torres, E.M. Waisman, T.C. Wagoner, T.L. Gilliland // Physical Review E. – 2005. – 72. – 026404 (1-21).
  26. 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. – 10. – 030401 (1-21).
27. Mazarakis, M.G. High current fast 100-ns LTD driver development in Sandia laboratory / M.G. Mazarakis, W.E. Fowler, F.W. Long, D.H. McDaniel, C.L. Olson, S.T. Rogowski, R.A. Sharpe, K.W. Struve, A.A. Kim // *Proc. 15<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf.*, Monterey, USA. – 2005. – P.390-393.
28. Stygar, W.A. Conceptual designs of two petawatt-class pulsed-power accelerators for high-energy-density-physics experiments / W.A. Stygar, T.J. Awe, J.E. Bailey, N.L. Bennett, E.W. Breden, E.M. Campbell, R.E. Clark, R.A. Cooper, M.E. Cuneo, J.B. Ennis, D.L. Fehl, T.C. Genoni, M.R. Gomez, G.W. Greiser, F. R. Gruner, M.C. Herrmann, B.T. Hutsel, C.A. Jennings, D.O. Jobe, B.M. Jones, M.C. Jones, P.A. Jones, P.F. Knapp, J.S. Lash, K.R. LeChien, J.J. Leckbee, R.J. Leeper, S.A. Lewis, F.W. Long, D.J. Lucero, E.A. Madrid, M.R. Martin, M.K. Matzen, M.G. Mazarakis, R.D. McBride, G.R. McKee, C.L. Miller, J.K. Moore, C.B. Mostrom, T.D. Mulville, K.J. Peterson, J.L. Porter, D.B. Reisman, G.A. Rochau, G.E. Rochau, D.V. Rose, D.C. Rovang, M.E. Savage, M.E. Sceiford, P.F. Schmit, R.F. Schneider, J. Schwarz, A.B. Sefkow, D.B. Sinars, S.A. Slutz, R.B. Spielman, B.S. Stoltzfus, C. Thoma, R.A. Vesey, P.E. Wakeland, D.R. Welch, M.L. Wisher, J.R. Woodworth // *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*. – 2015. – 18. – 110401 (1-30).
29. Chen, L. Development of a fusion-oriented pulsed power module / Lin Chen, Wenkang Zou, Liangji Zhou, Meng Wang, Yu Liu, Laqun Liu, Mingmeng Deng, Dagang Liu, Jianping Zhu, Kenan Lian, Bing Wei, Qing Tian, Fan Guo, An He, Shuping Feng, Weiping Xie, Lin Meng, Jianjun Deng, Yue Zhao, Le Zhang, Feng Li, Jihao Jiang, Jie Wang, Yuanjun Zhang, Yong Li, Yingmin Dai, Wenhui Han, Ye Li, Bin Yao, Yu Ding, Junjun Kang // *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*. – 2019. – 22. – 030401 (1-15).
30. Mao, C. Full-circuit simulation of next generation China Z-pinch driver CZ30 / Chongyang Mao, Fengju Sun, Chuang Xue, Ning Ding, Delong Xiao, Xiaoguang Wang, Guanqiong Wang, Shunkai Sun, Aici Qiu // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2019. – 47(6). – P.2910-2915.



31. Kim, A.A. 100 ns rise time LTD stage / A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, A.N. Bostrikov, V.G. Durakov, S.N. Volkov, V.A. Sinebryukhov // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA. – 2001. – P.1491-1494.
32. Kim, A.A. Development of the ultra-fast LTD stage / A.A. Kim, A.N. Bostrikov, S.N. Volkov, V.G. Durakov, B.M. Kovalchuk, V.A. Sinebryukhov // Proc. 14<sup>th</sup> IEEE Intern. Conf. High-Power Particle Beams, Albuquerque, NM, – 2002. – P.81–84.
33. Beal, J.W. The Astron linear accelerator / J.W. Beal, N.C. Christofilos, R.E. Hester // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1969. – 16(3). – P.294-298.
34. Вахрушин, Ю.П. Линейные индукционные ускорители – новые генераторы мощных пучков релятивистских электронов / Ю.П. Вахрушин, И.М. Матора // УФН. – 1973. – 110(1). – С.117-137.
35. Вахрушин, Ю.П. Линейные индукционные ускорители / Ю.П. Вахрушин, А.И. Анацкий. – М.: Атомиздат, 1978. – 248 с.
36. Винтизенко, И.И. Линейные индукционные ускорители / И.И. Винтизенко. – М.: Физматлит, 2016. – 304 с.
37. Ельчанинов, А.С. Импульсный генератор мегаамперного тока «СНОП-2» / А.С. Ельчанинов, Ф.Я. Загулов, Б.М. Ковальчук, Н.Ф. Ковшаров, В.А. Лавринович, А.В. Лучинский, Г.А. Месяц, Ю.Ф. Поталицын, С.А. Сорокин, В.Ф. Федущак // ПТЭ. – 1985. – №4. – С.97-104.
38. Визирь, В.А. Мощный импульсный трансформатор / В.А. Визирь, А.С. Ельчанинов, Ф.Я. Загулов, Н.Ф. Ковшаров, С.А. Сорокин, В.Ф. Федущак // ПТЭ. – 1986. – №5. – С.95-98.
39. Ковшаров, Н.Ф. Импульсный генератор «СНОП-5» / Н.Ф. Ковшаров, А.В. Лучинский, Г.А. Месяц, Н.А. Ратахин, С.А. Сорокин, В.Ф. Федущак // ПТЭ. – 1987. – №6. – С.84-89.
40. Luchinskii, A.V. Powerful pulsed electrophysical transformers from the Institute of High-current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences / A.V. Luchinskii, N.A. Ratakhin, V.F. Fedushak, A.N. Shepelev // Russian Physics Journal. – 1995. – 38(12). – P.1246-1252.
41. 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.

42. Smith, I.D. Induction voltage adders and the induction accelerator family // Phys. Review ST – Accelerators and Beams – 2004. – 7. – 064801.
43. Ramirez, J.J Hermes III - a 16 TW short pulse gamma ray simulator / J.J Ramirez, K.R. Prestwich, J.A. Alexander, J.P. Corley, G.J. Denison, C.W. Huddle, D.L. Johnson, R.C. Pate, G.J. Weber, E.L. Burgess, R.A. Hamil, J.W. Poukey, T.W. Sanford, L.O. Seamons, G.A. Zawadzkas, I.D. Smith, P.W. Spence, L.G. Schlitt // Proc. 7<sup>th</sup> Intern. Conference on High-Power Particle Beams, Karlsruhe, Germany. – 1988. – P.149-157.
44. Pointon T.D. PIC simulations of power flow in a linear transformer driver for radiographic applications / T.D. Pointon, D.B. Seidel, J.J. Leckbee, B.V. Oliver // Proc. 18<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Chicago, USA. – 2011. – P.861-866.
45. Rose, D.V. Circuit models and three-dimensional electromagnetic simulations of a 1-MA linear transformer driver stage / D.V. Rose, C.L. Miller, D.R. Welch, R. E. Clark, E.A. Madrid, C.B. Mostrom, W.A. Stygar, K.R. LeChien, M.A. Mazarakis, W.L. Langston, J. L. Porter, J.R. Woodwor // Phys. Review – STAB. – 2010 – 13. – 090401.
46. Stygar, W.A. Shaping the output pulse of a linear-transformer-driver module / W.A. Stygar, W.E. Fowler, K.R. LeChien, F.W. Long, M.G. Mazarakis, G.R. McKee, J.L. McKenney, J.L. Porter, M.E. Savage, B.S. Stoltzfus, D.M. Van De Valde, J.R. Woodworth // Phys. Review – STAB, – 2009. – 12. – 030402.
47. Welch, D.R. Optimized transmission-line impedance transformers for petawatt-class pulsed-power accelerators / D.R. Welch, T.C. Genoni, D.V. Rose, N.L. Bruner, W.A. Stygar // Phys. Review – STAB, – 2008. – 11. – 030401.
48. 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 // Proc. 17<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Washington, USA. – 2009. – P.1186-1191.
49. Mazarakis, M.G. Experimental validation of the first 1-MA water-insulated MYKONOS LTD voltage adder / M.G. Mazarakis, M.E. Savage, W.E. Fowler, L.F. Bennett, M. Jones, F.W. Long, M.K. Matzen, D.H. McDaniel, R.G. McKee, J.L. McKenney, J.L. Porter, B.S. Stoltzfus, K.W. Struve, W.A. Stygar, J.R. Woodworth, A.A. Kim,

- V.A. Sinebryukhov, K.L. LeChien, P. Wakeland, K. Ward, J.G. Puissant, T.F. Chavez, P.A. Jones, D.J. Lucero, G. Natoni, S.A. Lewis // Proc. 18<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Chicago, USA. – 2011. – P.625-628.
50. Ковальчук, Б.М. Быстрый первичный накопитель на основе линейного импульсного трансформатора / Б.М. Ковальчук, В.А. Визирь, А.А. Ким, Е.В. Кумпяк, С.В. Логинов, А.Н. Бастриков, В.В. Червяков, Н.В. Цой, Ф. Монжо, Д. Хьюи // Изв. вузов. Физика. – 1997. – Т.40, Вып.12. – С.25-37.
51. Bastrikov, A.N. Fast primary energy storage based on linear transformer scheme / A.N. Bastrikov, 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 // Proc. 11<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Baltimore, USA. – 1997. – P.489-497.
52. Monjaux, Ph. Design of a modular experiment based on LTD concept for flux compression evaluation / Ph. Monjaux, F. Kovacs, J.F. Léon, P. L'Eplattenier, A. Morell // Proc. 13<sup>th</sup> International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS 2000), Nagaoka, Japan. – 2000. – P.123-126.
53. L'Eplattenier, P. ECF2: a pulsed power generator based on magnetic flux compression for K-shell radiation production / P. L'Eplattenier, F. Lassalle, C. Mangeant, F. Hamann, M. Bavay, F. Bayol, D. Huet, A. Morell, P. Monjaux, G. Avrillaud, B. Lalle // Proc. 14<sup>th</sup> Intern. Conf. on High Power Particle Beams, Albuquerque, USA. – 2002. – P.51-54.
54. Monjaux, Ph. Status on the microsecond flux compression experiment at CEG / Ph. Monjaux, J.P. Bedoch, Y. Cazal, R. Lamples, A. Morell, B. Roques // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA. – 2001. – P.310-313.
55. L'Eplattenier, P. OD numerical modelisation and optimization of flux compression experiments / P. L'Eplattenier, M. Bavay, G. Avrillaud, B. Lalle // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA. – 2001. – P.665-668.
56. Mangeant, Ch. SPHINX: a generator based on 1 microsecond current rise time LTD stages. Status and first results for production of soft X-ray radiation / Ch. Mangeant, B. Roques, R. Cadiergues, F. Bayol, F. Lassalle, J.P. Bedoch, J.L. Boyer, J.F. Cambonie, Y. Cazal, T. Chanconie, Ph. Combes, J.M. Delchie, R. Lample, S. Aspalles, A. Morell, S. Ritter, G. Rodriguez, L. Saule, J.C. Thomas // Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Conf. on High Power Particle Beams, St. Petersburg, Russia. – 2004. – P.209-212.

57. Lassalle, F. Status on the SPHINX machine based on the 1- $\mu$ s LTD technology / F. Lassalle, A. Loyer, A. Georges, B. Roques, H. Calamy, C. Mangeant, J. Cambonie, S. Laspalles, D. Cadars, G. Rodriguez, J. Delchié, P. Combes, R. Lample, T. Chanconie, J. Saves // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2008. – 36(2). – P.370-377.
58. Monjaux, Ph. SYRINX project: first results with a 640 kJ LTD accelerator / Ph. Monjaux, D. Huet, J.F. Leon, F. Kovacs, B.M. Kovalchuk, A.A. Kim // Proc. 11<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Baltimore, USA. – 1997. P. 687-697.
59. Бастриков, А.Н. Увеличение мощности линейного трансформатора посредством последовательного включения плазменных прерывателей тока / А.Н. Бастриков, А.А. Жерлицын, А.А. Ким, Б.М. Ковальчук, С.В. Логинов, В.П. Яковлев // Изв. вузов. Физика. – 1999. – 42(12). – С.9-14.
60. Ким, А.А. Ступень линейного трансформатора с током 750 кА и временем нарастания 400 нс / А.А. Ким, Б.М. Ковальчук, Е.В. Кумпяк, Н.В. Цой // Изв. вузов. Физика. – 1999. – 42(12). – С.3-8.
61. Kim, A.A. 0.75 MA, 400 ns rise time LTD stage / A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, E.V. Kumpjak, N.V. Zoi // Proc. 12<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Monterey, USA. – 1999. – P.955-958.
62. Kovalchuk, B.M. 10 stage LTD for e-beam diode / B.M. Kovalchuk, A.A. Kim, E.V. Kumpjak, N.V. Zoi, V.B. Zorin // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA. – 2001. – P. 1488-1490.
63. Avriillaud, G. GEPI: a compact pulsed power driver for isentropic compression experiments and for non shocked high velocity flyer plates / G. Avriillaud, L. Courtois, J. Guerre, P.L. Hereil, F. Lassalle, F. Bayol, P. L'Eplattenier, B. Kovalchuk, E. Kumpjak, N. Zoi, A. Kim // Proc. 14<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Dallas, USA. – 2003. – P.913-916.
64. Kovalchuk, B.M. Mega-ampere submicrosecond generator GIT-32 / B.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, V.N. Kiselev, E.V. Kumpyak, V.B. Zorin, V.V. Chupin, A.V. Morozov // Rev. Sci. Instrum. – 2007. – 78. – 033501.
65. Kovalchuk, B.M. Air insulated LTD stage with stored energy of 5.5 kJ and output power of 14 GW / B.M. Kovalchuk, A.A. Kim, E.V. Kumpjak, N.V. Tsou // Proc. 14<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Dallas, USA. – 2003. – P.1455-1457.

66. Kim, A.A. 100 ns rise time LTD stage / A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, A.N. Bostrikov, V.G. Durakov, S.N. Volkov, V.A. Sinebryukhov // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Las Vegas, USA. – 2001. – P.1491-1494.
67. Kovalchuk, B.M. Multi gap switch for Marx generators / B.M. Kovalchuk, A.A. Kim, E.V. Kumpjak, N.V. Zoi, J.P. Corley, K.W. Struve, D.L. Johnson, // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA. – 2001. – P.1739-1742.
68. 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. – 12(6). – 060401.
69. 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. – 13(8). – 080401.
70. 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. Review ST – Accelerators and Beams – 2009. – 12. – 050402.
71. Gilgenbach, R.M. MAIZE: A 1 MA LTD-driven Z-pinch at the University of Michigan / R.M. Gilgenbach, M.R. Gomez, J.C. Zier, W.W. Tang, D.M. French, Y.Y. Lau, M.G. Mazarakis, M. E. Cuneo, M. D. Johnston, B.V. Oliver, T.A. Mehlhorn, A.A. Kim, V.A. Sinebryukhov // Proc. AIP Conf. – 2009. – Vol.1088, No.1, P.259–262, doi: 10.1063/1.3079742.
72. Campbell, P.C. Diagnostic and power feed upgrades to the MAIZE facility / P.C. Campbell, J.M. Woolstrum, F. Antoulinakis, T.M. Jones, D.A. Yager-Elorriaga, S.M. Miller, N.M. Jordan, Y.Y. Lau, Ronald M. Gilgenbach, R.D. McBride, // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2018. – 46(11). – P.3973-3981.
73. Kim, A.A. Super fast 75 ns LTD stage / A.A. Kim, V.A. Sinebryukhov, B.M. Kovalchuk, A.N. Bostrikov, V.G. Durakov, S.N. Volkov, S.V. Frolov, V.M. Alexeenko, F. Bayol,

- C. Drouilly, F. Cubaynes, L. Veron, M. Toury, C. Vermare, R. Nicolas. // Proc. 16<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA. – 2007. – P.148-151.
74. В.А. Синябрюхов Быстрые ступени линейного трансформатора (LTD) с масляной изоляцией / Диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Томск. – 2009. – 103 с.
75. Xiaofeng, Jiang. A gas-insulated mega-ampere-class linear transformer driver with pluggable bricks / Xiaofeng Jiang, Fengju Sun, Zhiguo Wang, Hongyu Jiang, Aici Qiu, Xingwen Li, Jian Wu, Li Chen, Penghui Li, Shenli Jia, // Rev. Sci. Instrum., – 2020. – 91. – 123303.
76. Lin Chen, Wenkang Zou, Jihao Jiang, Liangji Zhou, Bing Wei, Fan Guo, An He, Weiping Xie, Jianjun Deng, Meng Wang, Jie Wang, Yuanjun Zhang “First results from a 760-GW linear transformer driver module for Z-pinch research” // Matter and Radiation at Extremes. – 2021. – 6. – 045901.
77. Sinars, D.B. Review of pulsed power-driven high energy density physics research on Z at Sandia / D.B. Sinars, M.A. Sweeney, C.S. Alexander, D.J. Ampleford, T. Ao, J.P. Apruzese, C. Aragon, D.J. Armstrong, K.N. Austin, T.J. Awe, A.D. Baczewski, J.E. Bailey, K. L. Baker, C.R. Ball, H.T. Barclay, S. Beatty, K. Beckwith, K.S. Bell, J.F. Benage, Jr., N.L. Bennett, K. Blaha, D.E. Bliss, J.J. Boerner, C.J. Bourdon, B.A. Branch, J.L. Brown, E.M. Campbell, R.B. Campbell, D.G. Chacon, G.A. Chandler, K. Chandler, P.J. Christenson, M.D. Christison, E.B. Christner, R.C. Clay III, K.R. Cochrane, A.P. Colombo, B.M. Cook, C.A. Coverdale, M.E. Cuneo, J.S. Custer, A. Dasgupta, J.-P. Davis, M.P. Desjarlais, D.H. Dolan III, J.D. Douglass, G.S. Dunham, S. Duwal, A.D. Edens, M.J. Edwards, E.G. Evstatiev, B.G. Farfan, J.R. Fein, E.S. Field, J.A. Fisher, T.M. Flanagan, D.G. Flicker, M.D. Furnish, B.R. Galloway, P.D. Gard, T.A. Gardiner, M. Geissel, J.L. Giuliani, M.E. Glinsky, M.R. Gomez, T. Gomez, G.P. Grim, K.D. Hahn, T.A. Hail, N.D. Hamlin, J.H. Hammer, S.B. Hansen, H.L. Hanshaw, E.C. Harding, A.J. Harvey-Thompson, D. Headley, M.C. Herrmann, M.H. Hess, C. Highstrete, O.A. Hurricane, B.T. Hutsel, C.A. Jennings, O.M. Johns, D. Johnson, M.D. Johnston, B.M. Jones, M.C. Jones, P.A. Jones, P.E. Kalita, R.J. Kamm, J.W. Kellogg, M.L. Kiefer, M.W. Kimmel, P.F. Knapp, M.D. Knudson, A. Kreft, G.R. Laity, P.W. Lake, D.C. Lamppa, W.L. Langston, J.S. Lash, K.R. LeChien, J.J. Leckbee, R.J. Leeper, G.T. Leifeste, R.W. Lemke, W. Lewis, S.A. Lewis, G.P. Loisel,

- Q.M. Looker, A.J. Lopez, D.J. Lucero, S.A. MacLaren, R.J. Magyar, M.A. Mangan, M.R. Martin, T.R. Mattsson, M.K. Matzen, A.J. Maurer, M.G. Mazarakis, R.D. McBride, H.S. McLean, C.A. McCoy, G.R. McKee, J.L. McKenney, A.R. Miles, J.A. Mills, M.D. Mitchell, N.W. Moore, C.E. Myers, T. Nagayama, G. Natoni, A.C. Owen, S. Patel, K.J. Peterson, T.D. Pointon, J.L. Porter, A.J. Porwitzky, S. Radovich, K.S. Raman, P.K. Rambo, W.D. Reinhart, G.K. Robertson, G.A. Rochau, S. Root, D.V. Rose, D.C. Rovang, C.L. Ruiz, D.E. Ruiz, D. Sandoval, M.E. Savage, M.E. Sceiford, M.A. Schaeuble, P.F. Schmit, M.S. Schollmeier, J. Schwarz, C.T. Seagle, A.B. Sefkow, D.B. Seidel, G.A. Shipley, J. Shores, L. Shulenburger, S.C. Simpson, S.A. Slutz, I.C. Smith, C.S. Speas, P.E. Specht, M.J. Speir, D.C. Spencer, P.T. Springer, A.M. Steiner, B.S. Stoltzfus, W.A. Stygar, J. Ward Thornhill, J.A. Torres, J.P. Townsend, C. Tyler, R.A. Vesey, P.E. Wakeland, T.J. Webb, E.A. Weinbrecht, M.R. Weis, D.R. Welch, J.L. Wise, M. Wu, D.A. Yager-Elorriaga, A. Yu, E.P. Yu // *Phys. Plasmas*. – 2020. – 27. – 070501, doi: 10.1063/5.0007476.
78. Stygar, W.A. Theoretical z-pinch scaling relations for thermonuclear-fusion experiments / W.A. Stygar, M.E. Cuneo, R.A. Vesey, H.C. Ives, M.G. Mazarakis, G.A. Chandler, D.L. Fehl, R.J. Leeper, M. K. Matzen, D.H. McDaniel, J.S. McGurn, J.L. McKenney, D.J. Muron, C.L. Olson, J.L. Porter, J.J. Ramirez, J.F. Seamen, C.S. Speas, R.B. Spielman, K.W. Struve, J.A. Torres, E.M. Waisman, T.C. Wagoner, T.L. Gilliland // *Physical Review E*. – 2005. – 72. – 026404 (1-21).
79. Fan, Siyuan. Intelligent optimization of parameters for tens of MA-Class Z-pinch accelerators / Siyuan Fan, Hao Wei, Zhenzhou Gong, Xu He, Fengju Sun, Aici Qiu // *Laser and Particle Beams*. – 2022. – 2932175. – 10 p., doi: 10.1155/2022/2932175.
80. Lin, Zhou. Design of a 5-MA 100-ns linear-transformer-driver accelerator for wire array Z-pinch experiments / Zhou Lin, Li Zhenghong, Wang Zhen, Liang Chuan, Li Mingjia, Qi Jianmin, Chu Yanyun // *Phys. Review ST – Accelerators and Beams*, – 2016. – 19. – 030401.
81. Fan, Siyuan. Model of a 5-MA linear-transformer-driver accelerator: transmission-line-circuit method and three-dimensional field-circuit coupling method / Siyuan Fan, Hao Wei, Zhenzhou Gong, Hanyu Wu, Weibo Yao, Aici Qiu // // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2022. – 50(12). – P.4912-4918.

82. Gong, Zhenzhou. Model of a 5-MA linear-transformer-driver accelerator: comparison of MITL performance for bremsstrahlung electron beam diodes and Z-pinch loads / Zhenzhou Gong, Hao Wei, Siyuan Fan, Weibo Yao, Hanyu Wu, ici Qiu // *Laser and Particle Beams*. – 2023. – 2021696. – 11 p., doi: 10.1155/2023/2021696.
83. Spielman, R.B. Conceptual design of a 15-TW pulsed-power accelerator for high-energy-density-physics experiments / R.B. Spielman, D.H. Froula, G. Brent, E.M. Campbell, D.B. Reisman, M.E. Savage, M.J. Shoup III, W.A. Stygar, M.L. Wisner // *Matter and Radiation at Extremes*. – 2017. – 2. – P.204–223.
84. Mazarakis, M.G. A new linear inductive voltage adder driver for the Saturn accelerator / M.G. Mazarakis, R.B. Spielman, K.W. Struve, F.W. Long // *Sandia report, SAND2000-2031C*. – 2000. <https://doi.org/10.48550/arXiv.physics/0008120>.
85. Mazarakis, M.G. Conceptual design for a Linear Transformer Driver (LTD) based refurbishment and upgrade of the Saturn accelerator pulse-power system / M.G. Mazarakis, K.W. Struve // *Sandia report, SAND2006-5811*. – 2006. – 24 p.
86. Maysonave T. Design and testing of a surface switch for the dynamic load current multiplier on the SPHINX microsecond LTD / Maysonave, F. Bayol, G. Demol, T. d'Almeida, A. Morell, F. Lassalle, J. Grunenwald, A.S. Chuvatin, L. Pecastaing, A. Silvestre De Ferron // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2013. – 41(10). – P.2593-2599.
87. Kovalchuk, B.M. Linear transformer accelerator for excimer laser / B.M. Kovalchuk, E.N. Abdullin, D.M. Grishin, M.P. Gubanov, V.B. Zorin, A.A. Kim, E.V. Kumpjak, A.V. Morozov, V.S. Skakun, A.S. Steptchenko, V.F. Tarasenko, V.S. Tolkachev, P.M. Schanin, N.V. Tsoy // *Laser and Particle Beams*. – 2003. – 21. – P.219-222.
88. Абдуллин, Э.Н. ХеСl-лазер с энергией излучения 650 Дж / Э.Н. Абдуллин, Д.М. Гришин, В.П. Губанов, В.Б. Зорин, А.А. Ким, Б.М. Ковальчук, Е.В. Кумпяк, Д. Лио, А.В. Морозов, В.С. Скакун, А.С. Степченко, В.Ф. Тарасенко, В.С. Толкачев, Н.В. Цой, П.М. Щанин // *Квантовая электроника*. – 2004. – Т.34, №3. – С.199-202.
89. Kidd, A.K. Pulsed power system for Titania KrF laser module / S.M. Angood, R. Bailly-Salins, P.S. Carr, G.S. Hirst, M.J. Shaw // *Proc. 9<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf.*, Albuquerque, USA. – 1993. – P.718-722.



90. Sethian, J.D. The Nike electron beam-pumped KrF laser amplifiers / J.D. Sethian, C.J. Pawley, S.D. Obenschain, K.A. Gerber, V. Serlin, C. Sullivan // Proc. 10<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA. – 1995. – P.625-633.
91. Sethian, J.D. The Electra KrF laser program / J.D. Sethian, F. Hegeler, M. Myers, M. Friedman, S. Obenschain, R. Lehmborg, J. Giuliani, P. Kepple, S. Swanekamp, I. Smith, D. Weidenheimer, D. Morton, L. Schlitt, R. Smilgys, S. Searles // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA. – 2001. – P.232-236.
92. Abdulin, E.N. Accelerators with vacuum insulated Marx generators / E.N. Abdullin, S.P. Bugaev, A.M. Efremov, V.B. Zorin, B.M. Kovalchuk, S.V. Loginov, G.A. Mesyats, V.S. Tolkachev, P.M. Shanin, A.A. Chistov // Proc. 9<sup>th</sup> Intern. Conf. on High Power Particle Beams, Washington, USA. – 1992. – P.419-424.
93. Kim, A.A. 1 MV ultrafast LTD generator / A.A. Kim, A.N. Bostrikov, S.N. Volkov, V.G. Durakov, B.M. Kovalchuk, V.A. Sinebryukhov // Proc. 14<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Dallas, USA. – 2003. – P.853-854.
94. Bayol, F. Development of a 1 MV ultra-fast LTD generator / F. Bayofl, F. Cubaynes, R. Delplanque, P.Genez, C. Legras, M. Parzych, M. Toury, M. Caron, M. Mouillet, A.A. Kim // Proc. 18<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Chicago, USA. – 2011. – P. 619-624.
95. Toury, M. Transfer and test of a 1 MV LTD generator at CEA / M. Toury, F. Cartier, P. Combes, S. Cartier, R. Maisonnay, M. Caron, B. Etchessahar // Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., San Francisco, USA. – 2013. – P. 766-769.
96. Leckbee J. Linear transformer driver (LTD) research for radiographic applications / S. Cordova, B. Oliver, T. Webb, M. Toury, M. Caron, R. Rosol, B. Bui, T. Romero, D. Ziska // Proc. 18<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Chicago, USA. – 2011. – P. 614-618.
97. Leckbee, J.J. Design, simulation, and fault analysis of a 6.5-MV LTD for flash X-ray radiography / J.J. Leckbee, J.E. Maenchen, D.L. Johnson, S. Portillo, D.M. VanDeValde, D.V. Rose, B.V. Oliver // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2006. – 34(5). – P.1888-1899.
98. Corley, J.P. Sabre, a 10-MV linear induction accelerator / J.P. Corley, J.A. Alexander, P.J. Pankuch, C.E. Heath, D.L. Johnson, J.J. Ramirez, G.J. Denison // Proc. 8<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., San Diego, USA. – 1991. – P.920-923.

99. Smith, I.D. Design of a Radiographic Integrated Test Stand (RITS) based on a voltage adder, to drive a diode immersed in a high magnetic field / I.D. Smith, V.L. Bailey, J. Fockler, J.S. Gustwiller, D.L. Johnson, J.E. Maenchen, D.W. Droemer // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2000. – 28(5). – P.1653-1659.
100. Weidenheimer, D. Design of a driver for the Cygnus X-ray source / D. Weidenheimer, P. Corcoran, R. Altes, J. Douglas, H. Nishimoto, I. Smith, R. Stevens, D.L. Johnson, R. White, J. Gustwiller, J.E. Maenchen, P. Menge, R. Carlson, R. D. Fulton, G. Cooperstein, D. Droemer, E. Hunt // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA. – 2001. – P.591-595.
101. Kim, A.A. Square pulse linear transformer driver / A.A. Kim, M.G. Mazarakis, V.A. Sinebryukhov, S.N. Volkov, S.S. Kondratiev, V.M. Alexeenko, F. Bayol, G. Demol, W.A. Stygar // Phys. Rev. ST – Accelerators and Beams. – 2012. – 15. – 040401.
102. Kim, A.A. Square pulse LTD with 5<sup>th</sup> harmonic bricks / A.A. Kim, M.M. Mazarakis, V.M. Alexeenko, S.S. Kondratiev, J.J. Leckby, B.V. Oliver // Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conf., Las Vegas, USA. – 2001. – P.1354-1356.
103. Alexeenko, V.M. Sensitivity studies of the switch jitter effect on the Square pulse LTD with three harmonics / V.M. Alexeenko, M.G. Mazarakis, A.A. Kim, S.S. Kondratiev, S.V. Vasiliev, V.A. Sinebryukhov, J. Leckbee, M.I. Kiefer // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т.57, №12/2. – С.5-8.
104. Alexeenko, V.M. Factors affecting the output pulse flatness of the linear transformer driver cavity systems with 5<sup>th</sup> harmonics / V.M. Alexeenko, M.G. Mazarakis, A.A. Kim, S.S. Kondratiev, V.A. Sinebryukhov, S.N. Volkov, M.E. Cuneo, M.L. Kiefer, J.J. Leckby, B.V. Oliver, P.D. Maloney // Phys. Rev. ST – Accelerators and Beams. – 2016. – 19. – 090401.
105. Kim, A. Design and first tests of five 100 GW fast LTD cavities into an e-beam diode load / A. Kim, V. Sinebryukhov, B. Kovalchuk, A. Bostrikov, V. Durakov, S. Volkov, S. Frolov, V. Alexeenko, M. Mazarakis, D. McDaniel, C. Olson, K. Struve, R. Gilgenbach // Proc. 16<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA. – 2007. – P.144-147.
106. Kim, A.A. Multigap, multichannel spark switches / A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, V.V. Kremnev, E.V. Kumpjak, A.A. Novikov, B. Etlicher, L. Frescaline, J.F. Leon,

- B. Roques, F. Lassalle, R. Lample, G. Avriilaud, F. Kovacs // Proc. 11<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Baltimore, USA. – 1997. – P.862-867.
107. Liu, Xuandong. Experimental study on multigap multichannel gas spark closing switch for LTD / Xuandong Liu, Fengju Sun, Tianxue Liang, Xiaofeng Jiang, Qiaogen Zhang, Aici Qiu // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2009. – Vol.37, No.7. – P.1318-1323.
108. Liu, Xuandong. Study on firing conditions of multigap gas switch for fast linear transformer driver / Xuandong Liu, Fengju Sun, Tianxue Liang, Xiaofeng Jiang, Qiaogen Zhang, Aici Qiu // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2010. – Vol.38, No.7. – P.1670-1674.
109. А.с. 243063 СССР, МПК Н 01 J. Многоззорный разрядник / Б.М. Ковальчук, Г.А. Месяц, Ю.Ф. Поталицын (СССР). – №1196198/26-25; заявл. 10.11.1967; опубл. 05.05.1969, Бюл. №16. – 2 с.: ил.
110. Романенко, И.Н. Анализ основных характеристик системы параллельных импульсных дуг в плотных газах // Электричество. – 1975. – №12. – С.63-65.
111. Kovalchuk, B.M. Multi gap spark switches // Proc. 11<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Baltimore, USA. – 1997. – P.59-67.
112. Бастриков, А.Н. Низкоиндуктивные многоззорные разрядники / А.Н. Бастриков, А.А. Ким, Б.М. Ковальчук, В.В. Кремнев, Е.В. Кумпяк, А.А. Новиков, Н.В. Цой // Изв. вузов. Физика. – 1997. – 40(12). – С.5-16.
113. Sinebryukhov, V.A. Multi gap switch for fast LTD stages / V.A. Sinebryukhov, A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, S.V. Frolov, V.M. Alexeenko, S.N. Volkov. // Ab. XII Intern. Megagauss Magnetic Field Conf., Novosibirsk, Russia. – 2008. – P.65.
114. Kovalchuk, B.M. Pulsed generators based on air-insulated linear-transformer-driver stages / B.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, E.V. Kumpyak, A.A. Zherlitsyn // Phys. Rev. ST Accel. Beams. – 2013. – V.16. – P. 050401.
115. Жерлицын, А.А. Конденсаторные блоки с воздушной изоляцией для линейных трансформаторов / А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Г.В. Смородов // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №6. – С.45-46.
- Zherlityn. A.A. Capacitor units with air insulation for linear transformers / A.A. Zherlityn, B.M. Kovalchuk, G.V. Smorudov // Instruments and Experimental Techniques. – 2009. – Vol.52, No.6. – P.802–813.

116. Жерлицын, А.А. Многоазорный многоканальный разрядник, работающий в воздухе атмосферного давления при напряжении до 100 кВ / А.А. Жерлицын, Е.В. Кумпяк // Изв. ВУЗов. Физика. – 2018. – Т.61, №9/2 – С.120-124.
117. Жерлицын, А.А. Исследование стабильности срабатывания управляемого многоазорного разрядника для емкостных накопителей с зарядным напряжением до 100 кВ и временем вывода энергии порядка 100 нс / А.А. Жерлицын, Е.В. Кумпяк, Г.В. Смородов // Изв. ВУЗов. Физика. – 2019. – Т.62, №7 – С.53-58. doi: 10.17223/00213411/62/7/53.
118. Г.А. Месяц – Генерирование мощных наносекундных импульсов / Из-во “Советское радио”, Москва, 1974, 256 с.
119. Ковальчук, Б.М. Сильноточные наносекундные коммутаторы / Б.М. Ковальчук, В.В. Кремнев, Ю.Ф. Поталицын. – Новосибирск: Из-во “Наука”, 1979. – 176 с.
120. Zherlitsyn, A.A. Multichannel switching in a multigap gas switch at atmospheric pressure / A.A. Zherlitsyn, E.V. Kumpyak // Phys. Rev. ST Accel. Beams. – 2020. – 23. – 100402. doi: 10.1103/PhysRevSTAB.23.100402.
121. Zherlitsyn, A. Effect of electrical isolation between channels on multigap switch parameters / A. Zherlitsyn, E. Kumpyak, G. Smorudov, // IEEE Xplore 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) – 2020 – P.289–292. doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242015.
122. Электронный каталог ОАО «СКЗ «КВАР» 2015 [Электронный ресурс]. – URL: <http://kvar.su/katalog/kondensatory-silovye/kondensatory-impulsnye/> (дата обращения: 10.03.2020).
123. Электронный каталог ЗАО «Русская Технологическая Группа» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.rustechgroup.ru> (дата обращения: 06.03.2020).
124. Электронный каталог ЗАО «ЭЛКОД». Конденсаторы с органическим диэлектриком. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.elcod.spb.ru/catalogue.pdf> (дата обращения: 06.03.2020).
125. Электронный каталог General Atomics [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ga.com/series-pds-pdss-fast-pulse-capacitors> (Дата обращения: 06.03.2020).
126. Электронный каталог NWL, Inc. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nwl.com/products/capacitors/p-series> (Дата обращения: 27.09.2018)

127. Электронный каталог Pluspark [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.plusparkstar.com/a/CAPACITOR\\_TYPE/High\\_Voltage\\_Capacitor](http://www.plusparkstar.com/a/CAPACITOR_TYPE/High_Voltage_Capacitor) (Дата обращения: 06.03.2020).
128. Kovalchuk, V.M. Capacitor blocks for linear transformer driver stages / V.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, E.V. Kumpyak, G.V. Smorudov, A.A. Zherlitsyn // *Rev. Sci. Instrum.* – 2014. – 85. – 013501.
129. Kovalchuk, V.M. Investigation and simulation of the capacitor discharge through a multichannel spark gap / V.M. Kovalchuk, E.V. Kumpjak, A.A. Zherlitsyn // *Ab. XII Intern. Megagauss Magnetic Field Conf., Novosibirsk, Russia.* – 2008. – P.125.
130. Martin, J.C. Multichannel gaps / J.C. Martin // *Advances in Pulsed Power Technology.* – 1996. – V.3. – Chapter 10. – P. 295–333.
131. Кремнев, В.В. Методы умножения и трансформации импульсов в силовоточной электронике / В.В. Кремнев, Г.А. Месяц. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1987. – 226 с.
132. Андреев, С.И. Развитие канала искрового разряда при большой крутизне нарастания тока в разрядном контуре / С.И. Андреев, М.П. Ванюков, А.Б. Комолов // *Журнал технической физики.* – 1962. – Т. 32, №1. – С.57-62.
133. Андреев, С.И. К теории развития искрового разряда / С.И. Андреев, Б.И. Орлов // *Журнал технической физики.* – 1965. – 35(8). – С.1411-1418.
134. Драбкина, С.И. К теории развития канала искрового разряда // *Журнал экспериментальной и теоретической физики.* – 1951. – Т. 21. – № 4. – С. 473–483.
135. Брагинский, С.И. К теории развития канала искры // *Журнал экспериментальной и теоретической физики.* – 1958. – Т. 34. – № 6. – С. 1548–1557.
136. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
137. URL: <http://www.orcad.com/products/orcad-capture/overview>.
138. URL: <http://spectrum-soft.com>.
139. Martin, T.H. Energy losses in switches / T.H. Martin, J.F. Seamen, D.O. Jobe // *Proc. 9<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA.* – 1993. – P.463-470.
140. Жерлицын, А.А. Увеличение эффективности вывода энергии в электронный диод за счет вспомогательного разряда, генерируемого предимпульсом / А.А. Жерлицын, Н.В. Цой // *Изв. вузов. Физика.* – 2018. – Т.61, №6. – С.126-130.

- Zherlitsyn, A.A. Increasing efficiency of energy output to an electron diode by means of auxiliary discharge generated by prepulse / A.A. Zherlitsyn, N.V. Tsoy // Russian Physics Journal. – 2018. – 61(6). – P.1143-1147. doi: 10.1007/s11182-018-1508-1.
141. Zherlitsyn, A.A. A submicrosecond high-current electron beam source with an explosive-emission cathode and an auxiliary discharge initiated by a pre-pulse / A.A. Zherlitsyn, N.V. Tsoy // Proc. 20<sup>th</sup> International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE), Tomsk, Russia – 2018, P.107-112. DOI: 10.1109/ISHCE.2018.8521208.
142. Kharlov, A.V. 40 GW LTD stage for pulse generators of megaampere range / A.V. Kharlov, B.M. Kovalchuk, E.V. Kumpjak, A.A. Zherlitsyn, N.V. Tsoy, V.A. Vizir, G.V. Smorudov // Ab. XII Intern. Megagauss Magnetic Field Conf., Novosibirsk, Russia. – 2008. – P.128.
143. Kovalchuk, B.M. 40 GW Linear Transformer Driver stage for pulse generators of Mega-ampere range / B.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, A.A. Zherlitsyn, E.V. Kumpjak, N.V. Tsoy, V.A. Vizir, G.V. Smorudov // Laser and Particle Beams. – 2009 –27(3). – P. 371-378.
144. Kharlov, A.V. Investigation of a linear transformer of megaampere level at operation on resistive-inductive load / A.V. Kharlov, B.M. Kovalchuk, E.V. Kumpyak, A.A. Zherlitsyn, V.B. Zorin, G.V. Smorudov, F. Bayol, F. Lassalle // Proc. 16<sup>th</sup> Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk, Russia. – 2010. – P.261-264.
145. Ицхоки, Я.С. Импульсная техника / Я.С. Ицхоки. – М.: Советское радио, 1949. – 296 с.
146. Меерович, Л.А. Магнитные генераторы импульсов / Л.А. Меерович, И.М. Ватин, Э.Ф. Зайцев, В.М. Кандыкин. – М.: Советское радио, 1968. – 476 с.
147. Vizir, V.A. Submicrosecond pulsed high-power transformer magnetic cores / V.A. Vizir, A.D. Maksimenko, V.I. Manylov, G.V. Smorudov // 13<sup>th</sup> Symp. High Current Electronics, Tomsk. – 2004. – P.198-200.
148. Kim, A.A. Energy loss due to eddy current in linear transformer driver (LTD) cores / A.A. Kim, M.G. Mazarakis, V.I. Manylov, V.A. Vizir, W.A. Styger // Proc. 16<sup>th</sup> Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk, Russia. – 2010. – P.265-268.
149. Kim, A.A. Energy loss due to eddy current in linear transformer driver cores / A.A. Kim, M.G. Mazarakis, V.I. Manylov, W.A. Styger // Phys. Rev. Special topics – Accelerators and beams. – 2010. – V.13. – P.070401.

150. Алексеев, С.В. Мультитераваттная фемтосекундная система гибридного типа на основе фотодиссоционного XeF(C-A)-усилителя видимого диапазона / С.В. Алексеев, А.И. Аристов, Н.Г. Иванов, Б.Н. Ковальчук, В.Ф. Лосев, Г.А. Месяц, Л.Д. Михеев, Ю.Н. Панченко, Н.А. Ратахин // Квантовая электроника. – 2012. – 42(5). – С.377-378.
151. Алексеев, С.В. Гибридные фемтосекундные системы видимого диапазона на основе XeF(C-A)-усилителя: состояние и перспективы / С.В. Алексеев, А.И. Аристов, Я.В. Грудцын, Н.Г. Иванов, Б.М. Ковальчук, В.Ф. Лосев, С.Б.Мамаев, Г.А. Месяц, Л.Д. Михеев, Ю.Н. Панченко, А.В. Поливин, С.Г. Степанов, Н.А. Ратахин, В.И. Яловой, А.Г. Ястремский // Квантовая электроника. – 2013. – 43(3). – С.190-200.
152. Алексеев, С.В. Модернизация лазерной системы THL-100 для получения мощного ТГц-излучения / С.В. Алексеев, Ю.М. Андреев, В.Ф. Лосев, Д.М. Лубенко // Известия Вузов. Физика. – 2019. – 65(11). – С.178-182.
153. Kharlov, A.V. Electron accelerator for pumping of the Xe<sub>2</sub> lamp / A.V. Kharlov, B.M. Kovalchuk, S.N. Volkov, A.A. Zherlitsyn, A.N. Bostrikov, V.B. Zorin, V.N. Kiselev, G.V. Smorudov and N.V. Tsoy // 16<sup>th</sup> Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk, Russia. – 2010. – P.7-10.
154. Kovalchuk, B.M. Electron-beam accelerator for pumping of a Xe<sub>2</sub> lamp / B.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, S.N. Volkov, A.A. Zherlitsyn, V.B. Zorin, G.V. Smorudov, V.N. Kiselev // Laser and Particle Beams. – 2012. – 30(1). – P.23-29.
155. Zherlitsyn, A.A. Air insulated LTD for E-beam diode / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, G.V. Smorudov, N.V. Tsoy, V.A. Visir, V.B. Zorin // 15<sup>th</sup> Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk. – 2008. – P.296-298.
156. Беломытцев, С.Я. Применение цилиндрического диода в качестве нагрузки с вакуумной изоляцией в высоковольтных генераторах / С.Я. Беломытцев, А.А. Гришков, А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №3. – С.63-69.
157. Greedon, J.M. Magnetic cutoff in high-current diodes // J. Appl. Phys. – 1977. – 48(3). – P.1070-1077.
158. Гордеев, А.В. О распространении волны магнитной самоизоляции в коаксиальной линии // Журнал технической физики. – 1978. – Т.48, Вып.4. – С.784-788.

159. Belomyttsev, S.Ya. Approximation of the limiting self-magnetic insulation current in MITL / S.Ya. Belomyttsev, A.V. Kirikov, V.V. Ryzhov // Proc. 13<sup>th</sup> Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk. – 2004. – P.77-79.
160. Беломытцев, С.Я. К теории магнитоизолированных вакуумных линий / С.Я. Беломытцев, А.В. Кириков, В.В. Рыжов // ПЖТФ. – 2005. – Т.31, В.9. – С.76-82.
161. Ekdahl, C.A. Voltage and current sensors for a high-density z-pinch experiment // Rev. Sci. Instrum. – 1980. – 51(12). – P.1645-1648.
162. Козырев, А.В. Жерлицын Оптимизация передачи энергии из LC-контура в кинетическую энергию металлической токонесущей пластины / А.В. Козырев, А.А. Жерлицын // Proc. 8<sup>th</sup> International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022). – 2022. – С.426-429. DOI: 10.56761/EFRE2022.S4-P-035203.
163. Zherlitsyn, A.A. Plasma-filled diode with using laser produced plasma / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, V.M. Orlovskii, N.N. Pedin // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т.55, №10/3. – P.448-451.
164. Zherlitsyn, A.A. A compact air-insulated generator for e-beam diode / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т.55, №10/3. – С.443-447.
165. Kharlov, A.V. Pulsed generators on base of LTD stages with vacuum insulation in a secondary turn / A.V. Kharlov, B.M. Kovalchuk, E.V. Kumpyak, A.A. Zherlitsyn // Proc. 25<sup>th</sup> Intern. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Tomsk, Russia. – 2012. – P.425-428.
166. Kovalchuk, B.M. A compact submicrosecond, high current generator / B.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, V.B. Zorin, A.A. Zherlitsyn // Rev. Sci. Instrum. – 2009. – 80. – 083504.
167. Bayol, F. Development of an air insulated fast LTD pulser for radiography application / F. Bayol, R. Delplanque, C. Gaston, P. Mouly, T. Maysonnave, K. Van de Wiel, V. Zacharewicz, S. Briscall, S. Hill, A. Jones, L. Rickard, M. Sinclair, M. Weeks // Proc. 20<sup>th</sup> Intern. Conference on High-Power Particle Beams, Marriott Wardman Park, Washington DC, USA. – 2014. – DOI: 10.1109/PLASMA.2014.7012759
168. Bayol, F. Development and test of a ~800 kV, ~35 kA air insulated LTD pulser for radiography application / F. Bayol, J. Calvignac, R. Delplanque, C. Gaston, P. Mouly,



- K. Van de Wiel, S. Briscall, S. Hill, A. Jones, M. Sinclair, M. Weeks // Proc. 20<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Austin, USA. – 2015. – DOI: 10.1109/PPC.2015.7296972.
169. Zherlitsyn, A.A. Foil-less plasma-filled diode / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin // Proc. 5<sup>th</sup> Euro-Asian Pulsed Power Conf. Kumamoto, Japan, September 8–12, 2014. – P.478-480.
170. Eltchaninov, A.A. Foil-less plasma-filled diode for HPM generator / A.A. Eltchaninov, B.M. Kovalchuk, I.K. Kurkan, A.A. Zherlitsyn // Journal of Physics: Conf. Series. – 2014. – 552. – 012031.
171. Zherlitsyn, A.A. Pulsed current generator with variable pulse shape / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, E.V. Kumpyak // Proc. 14<sup>th</sup> Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk, Russia. – 2006. – P.287-289.
172. Tsygankov, R.V. S-band coaxial vircator with electron beam premodulation based on compact LTD / R.V. Tsygankov, S.A. Kitsanov, B.M. Kovalchuk, S.D. Polevin, M.Yu. Suhov, A.A. Zherlitsyn // Proc. 16<sup>th</sup> Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk. – 2010. – P.423-426.
173. Kovalchuk, B.M. S-Band coaxial vircator with electron beam premodulation based on compact linear transformer driver / B.M. Kovalchuk, S.D. Polevin, R.V. Tsygankov, A.A. Zherlitsyn // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2010. – 38(10). – P.2819-2824.
174. Коваль, Н.Н. Эффективное использование дуги низкого давления в сетчатом плазменном эмиттере электронов / Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндел, Г.А. Месяц, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // Письма в ЖТФ. – 1983. – 9(9). – С.568-572.
175. Коваль, Н.Н. Формирование импульсного разряда низкого давления при принудительном иницировании катодного пятна / Н.Н. Коваль, Ю.Д. Королев, В.Б. Пономарев, В.Г. Работкин, И.А. Шемякин, П.М. Щанин // Физика плазмы. – 1989. – 15(6). – С.747-752.
176. Bugaev, S.P. A generator of large current pulses of short duration / S.P. Bugaev, F.Ya. Zagulov, B.M. Koval'chuk, G.A. Mesyats // Soviet Physics Journal – 1968. – 11(1). – P.89-90.
177. Mesyats, G.A. Explosive Emission Electrons from Metallic Needles / G.A. Mesyats, D.I. Proskurovskii // JETP Letters, – 1971. – 13(1). – P.4-6.
178. Levine, L.S. Pulsed power technology for controlled thermonuclear fusion / L.S. Levine, I.M. Vitkovitsky // IEEE Trans. Nuclear Sci. – 1971. – 18(4). – P.255-264.

179. Баженов, Г.П. О влиянии предимпульса на величину тока, отбираемого с катода вакуумного диода, работающего в режиме взрывной эмиссии / Г.П. Баженов, В.П. Ротштейн // Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных электронов. – Новосибирск: Наука, 1974. – С.67-71.
180. Davis, H.A. Intense ion beam optimization and characterization with infrared imaging / H.A. Davis, R.R. Bartsch, J.C. Olson, D.J. Rej, W.J. Waganaar // J.Appl. Phys. – 1997. – 82(7). – P.3223-3231.
181. Жерлицын, А.А. Исследование распространения сильноточного электронного пучка секционированного плазмонаполненного диода / А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук // ЖТФ. – 2016. – 86(5). – С.136-140.  
Zherlitsyn, A.A. Analysis of propagation of a high-current electron beam from a sectioned plasma-filled diode / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk // Technical Physics. – 2016. – 61(5) – P.774-778.
182. Кизириди, П.П. Исследование распределения плотности энергии нерелятивистского сильноточного электронного пучка с помощью тепловизора / П.П. Кизириди, А.Б. Марков, Г.Е. Озур, В.П. Фролова // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т.57, № 3/2, С.120-123.
183. Kiziridi, P.P. On the low energy high current electron beam profile controlled using ferromagnetic insertions / P.P. Kiziridi, G.E. Ozur // Technical Physics. – 2015. – 60(6). – P.917-921.
184. Zherlitsyn, A.A. Electron beam accelerator based on a diode with electro-explosive cathode for treatment of metal parts / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, E.V. Kumpyak, A.V. Kharlov, N.V. Tsoy // Изв. вузов. Физика. – 2016. – Т.59, №9/2. – С.123-126.
185. Grossmann, J.M. Gap formation processes in a high-density plasma opening switch / J.M. Grossmann, S.B. Swanekamp, P.F. Ottinger, R.J. Commisso, D.D. Hinshelwood, B.V. Weber // Phys. Plasmas. – 1995.–2(1). – P.299-309.
186. Goyer, J.R. Scaling of voltage with cathode radius of a plasma opening switch / J.R. Goyer, D. Kortbawi, P.S. Sincerny, D. Parks, E. Waisman // J. Appl. Phys. – 1995. – 77(6). – P.2309-2313.
187. Долгачев, Г.И. О предельных параметрах плазменного прерывателя тока / Г.И. Долгачев, А.Г. Ушаков // Физика плазмы. – 2001. – 27(2). – С.121-130.

188. Zherlitsyn, A.A. Plasma-filled diode based on the coaxial gun / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N. N. Pedin // *Rev. Sci. Instrum.* – 2012. – 83. – 104705.
189. Жерлицын, А.А. Плазменная пушка капиллярного типа для сильноточного плазмонаполненного диода / А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин // *Приборы и техника эксперимента.* – 2014. – №4. – С.83-88.
190. Zherlitsyn, A.A. Electron accelerator with plasma-filled diode / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin // *Proc. 16<sup>th</sup> Intern. Symp. on High Current Electronics, Tomsk, Russia.* – 2010. – P.269-272.
191. Kovalchuk, B.M. Plasma-filled diode in the electron accelerator on base of a pulsed linear transformer / B.M. Kovalchuk, A.A. Zherlitsyn, N.N. Pedin // *Laser and Particle Beams.* – 2010. – 28(4). – P.547-552.
192. Zherlitsyn, A.A. Plasma-filled diode in the electron accelerator on base of a pulsed linear transformer / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin // *Proc. 19<sup>th</sup> Intern. Conf. on High-Power Particle Beams, Karlsruhe, Germany.* – 2012. – P.184-187.
193. Жерлицын, А.А. Низкоомная фаза плазмонаполненного диода / А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин // *Изв. ВУЗов. Физика.* – 2014. – Том. 57, №12/2. – С.166-170.
194. Жерлицын, А.А. Увеличение мощности плазмонаполненного диода за счет скорости нарастания тока / А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин // *Изв. вузов. Физика.* – 2014. – Т.57, №12/2. – С.171-175.
195. Жерлицын, А.А. Исследование параметров электронного пучка плазмонаполненного диода / А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин // *ЖТФ.* – 2014. – 84(4). – С.132-135.
196. Belomyttsev, S.Ya. Megavolt range voltage measurement in vacuum through a short-circuited line / S.Ya. Belomyttsev, A.A. Grishkov, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin, A.A. Zherlitsyn // *Rev. Sci. Instrum.* – 2011. – 82. – 104702.
197. Беломытцев, С.Я. Распространение волны магнитной изоляции в вакуумной линии при наличии тока подмагничивания / С.Я. Беломытцев, А.А. Гришков, А.А.Жерлицын // *ЖТФ.* – 2012. – 82(11). – С.64-69.
198. Логинов, С.В. Энергетика импульсных генераторов с индуктивным накопителем и прерывателем тока // *Известия Томского политехнического университета.* – 2008. – Т.312, №4. – С.109-114.

199. Zherlitsyn, A.A. Plasma-filled diode power increase / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin // Proc. 5<sup>th</sup> Euro-Asian Pulsed Power Conf. Kumamoto, Japan. – 2014. – P.481-484.
200. Ефремов, А.М. Источник сильноточного релятивистского сфокусированного электронного пучка на основе плазмонаполненного диода / А.М. Ефремов, А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин, А.В. Харлов // Вестник РФФИ. – 2015. – 3(87). – С.32-44.
201. Zherlitsyn, A.A. Power increase of the electron source based on the plasma-filled diode / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2015. – 43(10). – P.3434-3439.