

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2025

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

Официальные оппоненты: Завьялов Николай Валентинович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор Института ядерной радиационной физики Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров.

Рукин Сергей Николаевич – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории импульсной техники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Пушкарев Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор отделения материаловедения инженерной школы новых производственных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится «__» июня 2025 г. в ____ на заседании диссертационного совета Д 003.031.02 при ИСЭ СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН и на сайте <https://hcei.tsc.ru/ru/obrazovanie/dissertations.html>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук

 Юшков Г.Ю.

Общая характеристика работы

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 задач, связанных с использованием интенсивных пучков заряженных частиц, мощного рентгеновского, лазерного и СВЧ излучений, сверхсильного импульсного магнитного поля 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 и индуктивные промежуточные накопители энергии. Как емкостные, так и индуктивные промежуточные накопители мощных установок заряжаются от первичных емкостных накопителей энергии за время ~ 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 ~ 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 [1] и их более мощная разновидность “impedance-matched Marx” [2], а также ЛТД генераторы (английская аббревиатура LTD – Linear Transformer Driver) [3].

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 ~100 нс, в том числе для целей УТС [4, 5]. 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 [6]. В этих ступенях при зарядном напряжении ± 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 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) в 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 полувывоте 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 родственным 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.

Основное содержание работы

Во **введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели, задачи, научная новизна и практическая значимость работы, представлены защищаемые положения, отмечен личный вклад автора.

Первый раздел представляет обзор наиболее важных, по мнению автора, имеющих в научной литературе данных по тематике диссертации. Изложены основные принципы ЛТД технологии и состояние дел по теме диссертации, обоснованы задачи работы.

ЛТД генераторы относятся к импульсным генераторам индукционного типа наряду с линейными индукционными ускорителями (ЛИУ) [7, 8], линейными импульсными трансформаторами (ЛИТ) [9, 10] и индукционными сумматорами напряжения (IVA, английская аббревиатура – Inductive Voltage Adder) [11]. ЛТД генератор представляют собой последовательный ряд

идентичных индукторов, образующих индукционную систему, 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.

Емкостной накопитель ЛТД ступени составлен, как правило, из нескольких параллельно включенных идентичных ветвей, содержащих конденсаторы, которые коммутируются своим разрядником. 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).

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 основе обзора научной литературы, посвященной ЛТД технологии, сделаны следующие обобщающие 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 (~ 1 МА) и малой длительности импульса (~ 100 нс) в ЛТД ступени необходимо использовать большое число секций с малой емкостью (≤ 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 ± 100 кВ, обеспечивающие время вывода энергии в нагрузку порядка 100 нс. Созданы ЛТД ступени с зарядным напряжением ± 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. 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.

Во **втором разделе** описаны принцип действия, конструкция, результаты испытаний и основные параметры искрового разрядника атмосферного давления с рабочим напряжением до 100 кВ, разработанного для емкостного накопителя ЛТД ступеней с временем вывода энергии порядка 100 нс. Фотография и конструкция двух вариантов такого разрядника показаны на рисунке 1. Широкий диапазон рабочего напряжения, быстроедействие и наносекундная стабильность запуска реализуются в многоззорных искровых разрядниках. 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. Изложенные соображения привели к тому, что при разработке низкоиндуктивного разрядника с рабочим напряжением до 100 кВ сделан выбор в пользу многозазорной многоканальной конфигурации. 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.

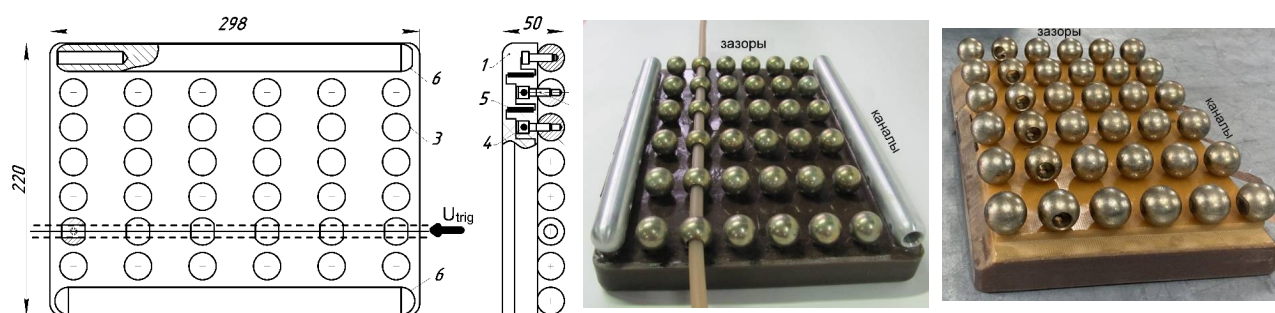


Рисунок 1 – Два варианта разрядника: 1 – корпус разрядника; 2 – детали для крепления электродов; 3 – электроды разрядника; 4 – шнуры из проводящей резины или спирали из нержавеющей стали; 5 – резистивный делитель напряжения; 6 – высоковольтный и низковольтный концевые электроды

Корпус разрядника выполнен из компаунда на основе эпоксидной смолы и кварцевой пудры. В компаунд залиты детали, на которых закрепляются электроды разрядника. Семь зазоров в разряднике образованы шестью рядами сферических электродов 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 крайние высоковольтный и низковольтный электроды 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, 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. Параллельно высоковольтному и низковольтному электроду пропущены шнуры из проводящей резины, с помощью которых обеспечивается распределение напряжения по электродам во всех остальных каналах. Сопротивление резины между соседними каналами одного ряда ≈ 0.7 МОм. Резистивные элементы залиты внутри корпуса разрядника, благодаря чему исключается электрический пробой вдоль их поверхности.

Второй вариант разрядника 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. 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, 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 из нержавеющей стали. Индуктивность спирали между соседними электродами ≈ 0.9 мкГн, сопротивление ≈ 2 Ом. Указанные изменения позволили улучшить равномерность распределения напряжения по электродам 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 в полиэтиленовой изоляции. Развязка основного разрядного контура и пусковой цепи по постоянному напряжению обеспечивается за счет разделительной емкости между пусковым проводником и электродами второго ряда.

Экспериментально определены характеристики разрядника. Помимо измерения электрофизических параметров использовалась оптическая система диагностики для регистрации искровых каналов, которая позволяла набирать статистику и определять вероятность зажигания каждого из шести каналов в каждом из семи зазоров разрядника.

В исследованиях варьировались зарядное напряжение и скорость нарастания пускового импульса. Набиралась статистика времени запаздывания между приходом пускового импульса напряжения и пробоем всех зазоров разрядника. Статистическое время запаздывания характеризуется средним временем запаздывания и среднеквадратичным отклонением от среднего значения (джиттер разрядника). При использовании импульса пускового напряжения со средней скоростью нарастания около 1 кВ/нс получен джиттер разрядника менее 10 нс, а его рабочий диапазон напряжения 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. Достигнуто параллельное зажигание всех 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 (рисунок 2).

Данные по ресурсу разрядника получены в серии из $\sim 10^5$ включений, когда разрядник не обслуживался. В испытаниях амплитуда тока через разрядник составляла ≈ 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 ≈ 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 ≈ 5 нс.

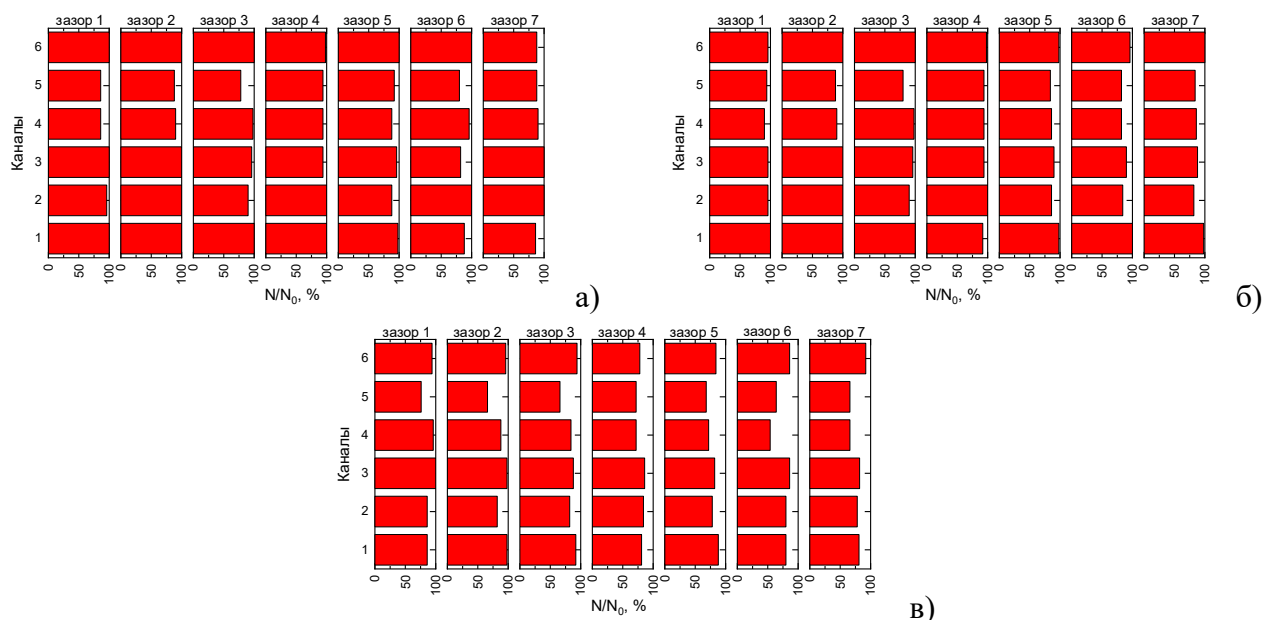


Рисунок 2 – Вероятности зажигания искровых каналов в зазорах разрядника с индуктивной развязкой между каналами при средней скорости нарастания импульса пускового напряжения 0.4 кВ/нс и зарядном напряжении 90 кВ (а), 80 кВ (б) и 70 кВ (в)

В третьем разделе представлены результаты разработки секций из параллельно включенных конденсаторов и искрового разрядника в едином жестком корпусе из компаунда на основе эпоксидной смолы.

Помимо разрядника ключевым элементом секции, определяющим ее характеристики, является конденсатор. Его параметры определяют возможность получения выходного импульса заданной длительности и мощности. В диссертационной работе представлен анализ параметров ряда серийно выпускаемых импульсных конденсаторов, имеющих наиболее высокие удельные характеристики, с уровнем рабочего напряжения около 100 кВ, емкостью порядка 10–100 нФ и индуктивность менее 100 нГн. Согласно этому анализу лучшими характеристиками обладают конденсаторы американской фирмы General Atomics (GA) серии 35xxx, а также конденсаторы китайского производства СВВ94. 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, а затем и китайские конденсаторы были выбраны и использованы в секциях ЛТД ступеней. Эти конденсаторы выполнены в пластиковом корпусе и предназначены для использования в трансформаторном масле, что связано с электрической прочностью внешней поверхности корпуса. Для усиления внешней изоляции была разработана

технология размещения конденсаторов внутри жесткого корпуса из компаунда на основе эпоксидной смолы. 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. Это существенно улучшает эксплуатационные качества секции, расширяя возможности по компоновки емкостных накопителей энергии.

Конструкция и фотография секции с емкостью накопителя 160 нФ и максимальным зарядным напряжением 100 кВ (далее «секция 160 нФ») приведены на рисунке 3. Емкостной накопитель секции состоит из четырех параллельно включенных конденсаторов СВВ94, 40 нФ, 100 кВ. Конденсаторы залиты в корпус, имеющий полость для размещения разработанного разрядника планарной геометрии. Выводы конденсаторов соединяются с одной стороны со сборным электродом разрядника, а с другой – со сборным электродом нагрузки. 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.

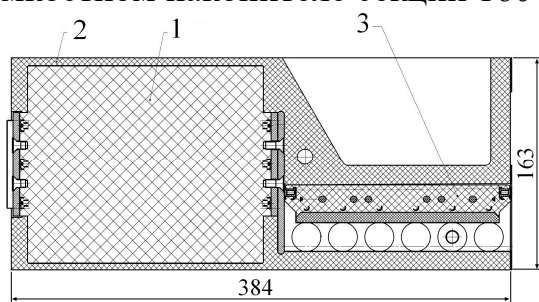


Рисунок 3 – Конструкция и фотография секции с емкостью накопителя 160 нФ:
1– конденсаторы; 2– корпус секции; 3– разрядник

Конструкция и фотография секции с емкостью накопителя 80 нФ и максимальным зарядным напряжением 100 кВ (далее «секция 80 нФ») приведены на рисунке 4. Здесь 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.

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.

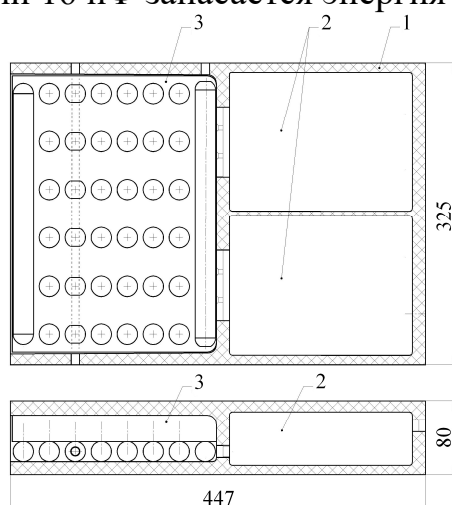


Рисунок 4 – Конструкция и фотография секции с емкостью накопителя 80 нФ:
1– корпус; 2– конденсаторы; 3– разрядник

В таблице 1 обобщены эквивалентные емкость C_B , индуктивность L_B и сопротивление R_B трех секций, рассчитанные из осциллограмм тока короткого замыкания. 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.

Таблица 1 – Эквивалентные параметры секций: C_B , L_B , R_B – емкость, индуктивность и сопротивление, соответственно

	C_B , нФ	L_B , нГн	R_B , Ом	$(L_B/C_B)^{1/2}$, Ом	$(L_B \cdot C_B)^{1/2}$, 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

Секция 80 нФ идентична секции ступени LTD-100 с масляной изоляцией [12] по числу и типу конденсаторов и, следовательно, запасаемой энергии. Секция 16 нФ идентична секции ступени LTD-16-8 с масляной изоляцией [13] 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.

Параметры выходного импульса секций получены при разряде на резистивную нагрузку. Сопротивление нагрузки подбиралось из критерия реализации мощности разряда, близкой к максимальной. 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.

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. Остался 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. 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 около 12 кА. Экспериментально подтверждена работоспособность разрядника без обслуживания в течение всего ресурса конденсаторов секции.

Разработана электрическая модель секций для проведения электротехнических расчетов переходного процесса разряда проектируемых генераторов на их основе.

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.

Внешний вид ЛТД ступени с воздушной изоляцией показан на рисунке 5. 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 генератора на ее основе; возможность обслуживания элементов ступени без полной разборки, что особенно важно при ее работе в составе модуля.

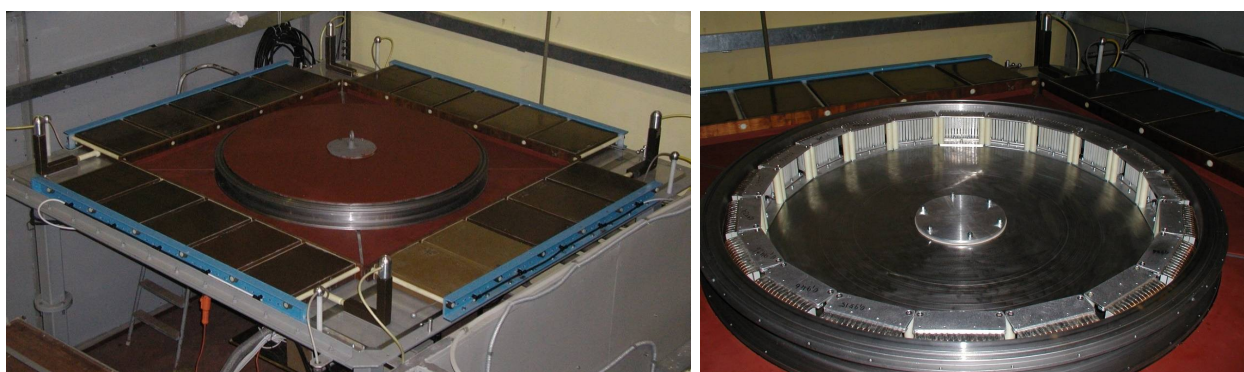


Рисунок 5 – Фотография ЛТД ступени со снятым сердечником (слева) и вид ступени со снятым верхним фланцем и установленными резисторами нагрузки (справа)

Ступень содержит емкостной накопитель энергии из двадцати секций 80 нФ, включенных параллельно. Секции разбиты на четыре идентичных сегмента 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 и прикреплены к ней низковольтной стороной с помощью болтовых соединений. Отсоединив болтовое соединение между сегментами и основанием ступени, можно извлечь любой из сегментов для ревизии без полной разборки ступени. Между секциями сегментов и плитой расположен изолятор из оргстекла толщиной 15 мм. В центральной части ЛТД ступени расположены кольца ферромагнитного сердечника. Кольца монтируются на опорном стальном кольце, к которому крепятся сборные электроды ступени. Стальное кольцо является внешним электродом выходной коаксиальной линии ступени. Габаритные размеры ступени 2.9 м × 2.9 м × 0.13 м. Вес ступени около 1200 кг.

Для исследования параметров ступени использовалась резистивная нагрузка, которая устанавливалась внутри центрального объема ступени. Применялась активная схема подмагничивания сердечника, когда ступень запускается в момент времени достижения током подмагничивания амплитудного значения. Пример осциллограмм и расчетных кривых, иллюстрирующие разряд ступени приведен на рисунке 6. В нагрузке 0.05 Ом ЛТД ступень обеспечивает импульс тока амплитудой 850 кА с временем нарастания импульса по уровню (0.1–0.9) от амплитудного значения 90 нс. В нагрузку выводится более 75 % запасаемой энергии за время между уровнями (0.1–0.9) 165 нс с пиковой мощностью 35 ГВт. По совокупности характеристик эта ЛТД ступень не имеет аналогов.

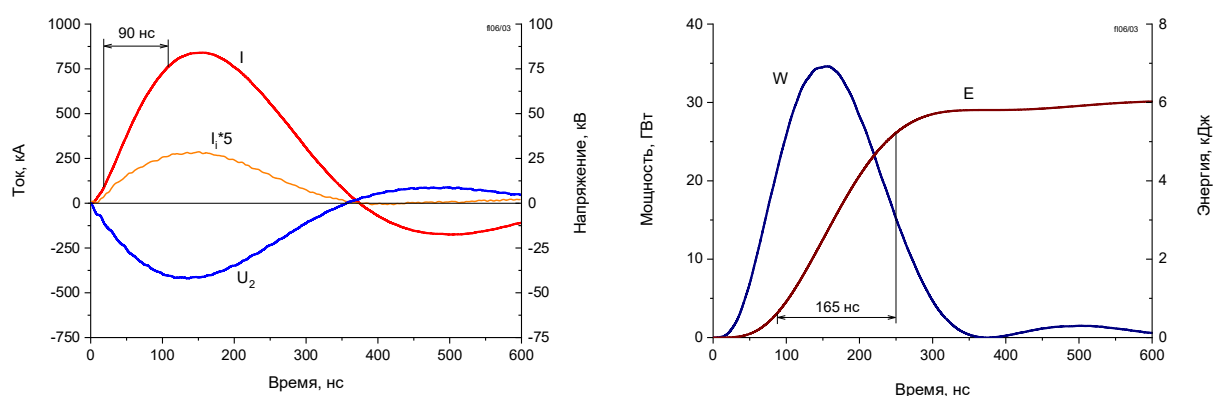


Рисунок 6 – Осциллограммы и расчетные кривые разряда ЛТД ступени на нагрузку 0.05 Ом, 1 нГн: I – ток нагрузки; I_i – ток в цепи индуктора (увеличен для наглядности в 5 раз); U – напряжение на нагрузке; W – мощность в нагрузке; E – энергия, выделившаяся в нагрузке

Реализовано последовательное включение двух ступеней, каждая из которых содержит 20 секций 80 нФ (рисунок 7). Сравнение экспериментальных осциллограмм разряда модуля в составе двух ЛТД ступеней (рисунок 8) с данными разряда единичной ступени (рисунок 6) показывает, что двукратное увеличение числа ступеней позволило поднять мощность выходного импульса в

≈ 1.9 раза при сохранении эффективности передачи энергии в нагрузку на уровне 75 %.

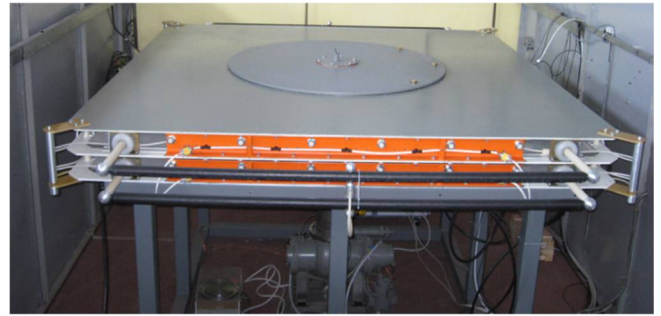
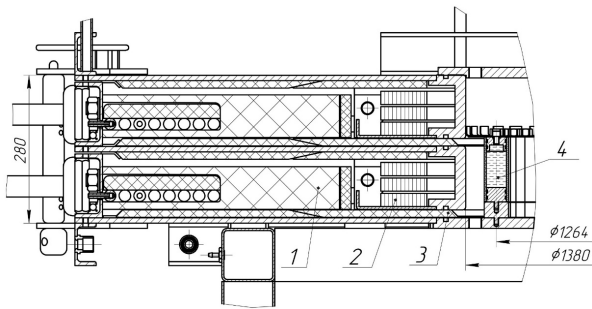


Рисунок 7 – Модуль в составе двух ЛТД ступеней: 1 – секции ступени; 2 – сердечник; 3 – проходной изолятор; 4 – резисторы нагрузки

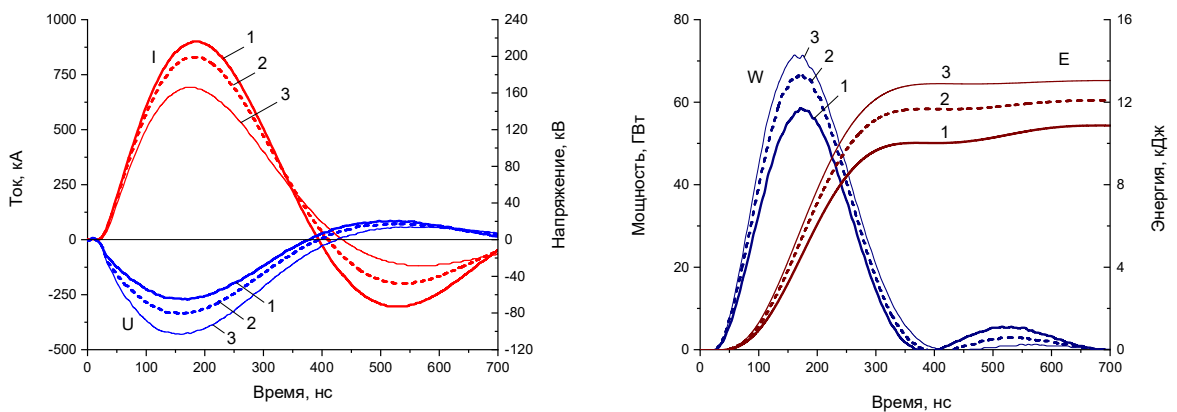


Рисунок 8 – Осциллограммы разряда модуля из двух последовательно включенных ЛТД ступеней на нагрузки 0.07 (1), 0.10 (2) и 0.14 (3) Ом: I – ток нагрузки; U – напряжение на нагрузке; W – мощность в нагрузке; E – энергия нагрузки

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 [14]. Первичный емкостной накопитель энергии этой ступени полностью идентичен эквивалентному емкостному накопителю двух последовательно включенных ступеней с воздушной изоляцией. Диаметр ступени LTDZ составляет 3 м; высота ступени – 0.22 м; объем ступени – 1.55 м^3 ; запасаемая энергия, пересчитанная на единицу объема ступени, 10.3 кДж/м^3 . Объем сборки из двух последовательно включенных ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления 2.3 м^3 , 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. Снижение удельной запасаемой энергии в 1.5 раза сопровождается уменьшением в ≈ 1.4 раза пиковой

мощности вывода энергии в нагрузку без снижения эффективности передачи энергии.

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/см³ при напряжении 500–700 кВ, длительность импульса накачки 250 нс. Разработан проект ЛТД генератора с двумя параллельно включенными модулями в составе двенадцати ступеней с общим энергозапасом 190 кДж и пиковой мощностью 700 ГВт. Составлена электрическая модель генератора на основе экспериментально полученных параметров ЛТД ступени с учетом контура индукторов с сердечником и коммутационной характеристики разрядников. Результаты моделирования подтверждают реализацию заданных параметров.

В пятом разделе приведены результаты, связанные с созданием ЛТД генератора для фемтосекундной лазерной системы THL-100.

Проект усилителя с объемом газовой активной среды 600 литров не получил продолжения в планируемом объеме и был сокращен до 200 литров. В результате в ИСЭ СО РАН совместно с ФИАН создана уникальная мультитераваттная гибридная фемтосекундная лазерная система видимого диапазона THL-100. Система включает твердотельный Ti:сапфировый стартовый лазерный комплекс и газовый XeF(C-A) усилитель. Усилитель (рисунок 9) включает в себя 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.

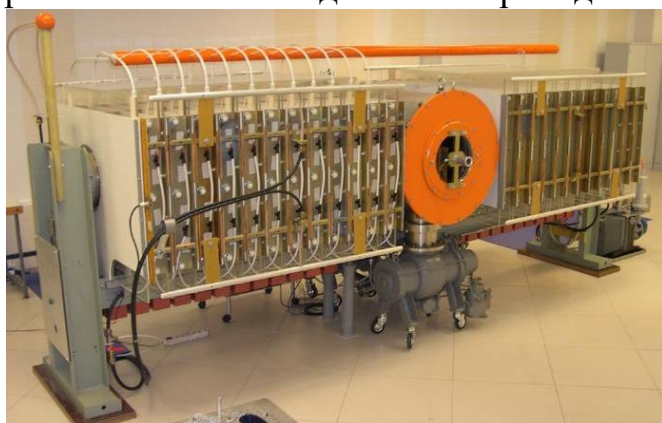


Рисунок 9 – Фотографии ЛТД генератора в составе двух модулей из двенадцати ступеней (слева) и XeF(C-A) усилителя мультитераваттной фемтосекундной лазерной системы THL-100 в сборе (справа)

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. 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.

На первом этапе был создан и запущен модуль в составе шести ЛТД ступеней (рисунок 10), 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 и т.д. перед строительством полноразмерного ЛТД генератора. В дальнейшем этот модуль был использован в качестве отдельного генератора для исследовательских целей.

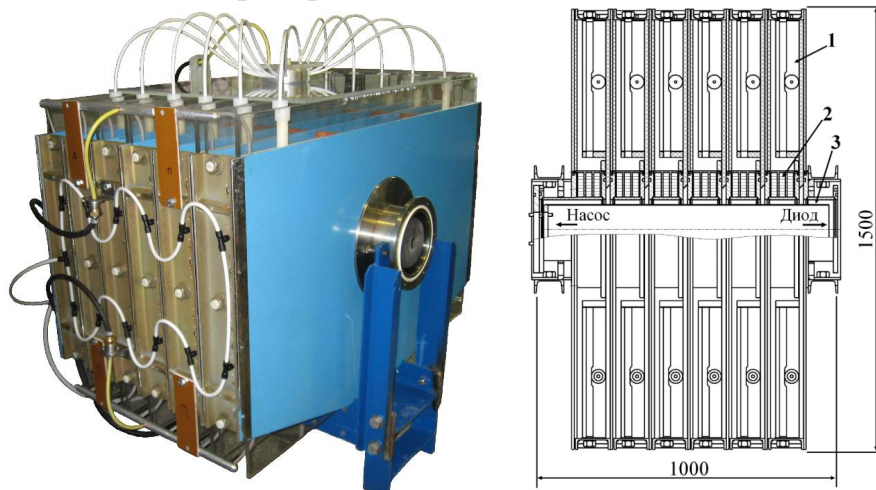


Рисунок 10 – Фотография и конструкция (вид сверху) модуля в составе шести ЛТД ступеней без системы откачки и нагрузки: 1 – секция ступени; 2 – сердечник ступени; 3 – выходная вакуумная коаксиальная линия

При разряде модуля в составе шести ЛТД ступеней на электронный диод с сопротивлением около 3.5 Ом амплитуда тока емкостного накопителя модуля достигает 130 кА, из них 112 кА протекает в диоде и 18 кА – в индукторе ЛТД ступеней (рисунок 11). Напряжение на диоде 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.

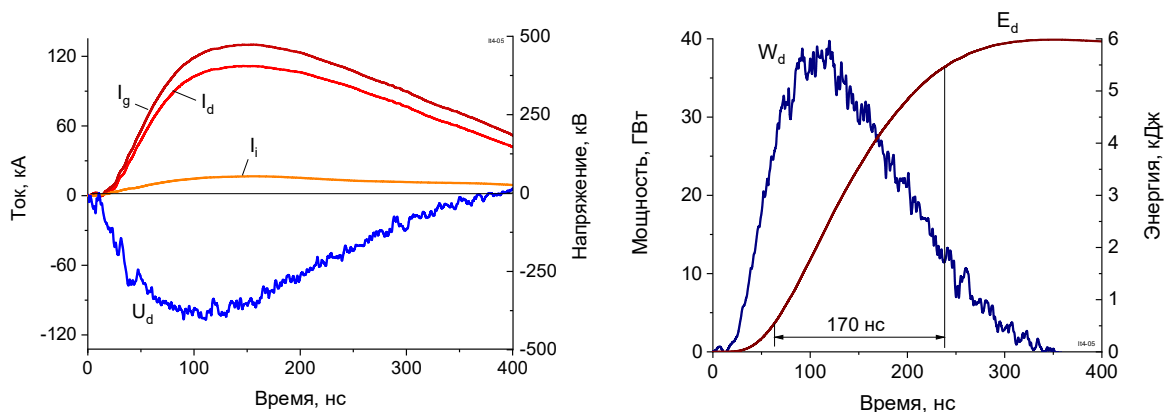


Рисунок 11 – Осциллограммы разряда модуля в составе шести ЛТД ступеней на цилиндрический электронный диод: I_g , I_d , I_i – полный ток емкостного накопителя модуля, токи в диоде и индукторе; U_d – напряжение на диоде; W_d , E_d – мощность и энергия в диоде

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.

На основе результатов испытания модуля в составе шести ЛТД ступеней созданы два модуля из двенадцати ЛТД ступеней и генератор на их основе (рисунок 9). Параметры генератора при зарядном напряжении ЛТД ступеней 85, 90 и 95 кВ обобщены в таблице 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 12). 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. При инжекции в газовую камеру электронный пучок поглощается ксеноном и его энергия преобразуется в ВУФ излучение, под действием которого осуществляется оптическая накачка лазерной смеси для усиления фемтосекундного лазерного излучения. На выходе лазерной системы достигнута мощность фемтосекундного излучения видимого диапазона спектра 40 ТВт [15].

Таблица 2 – Параметры генератора в составе двух модулей из двенадцати ЛТД ступеней

Зарядное напряжение, кВ	Запасаемая энергия, кДж	Ток диода, кА	Напряжение диода, 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

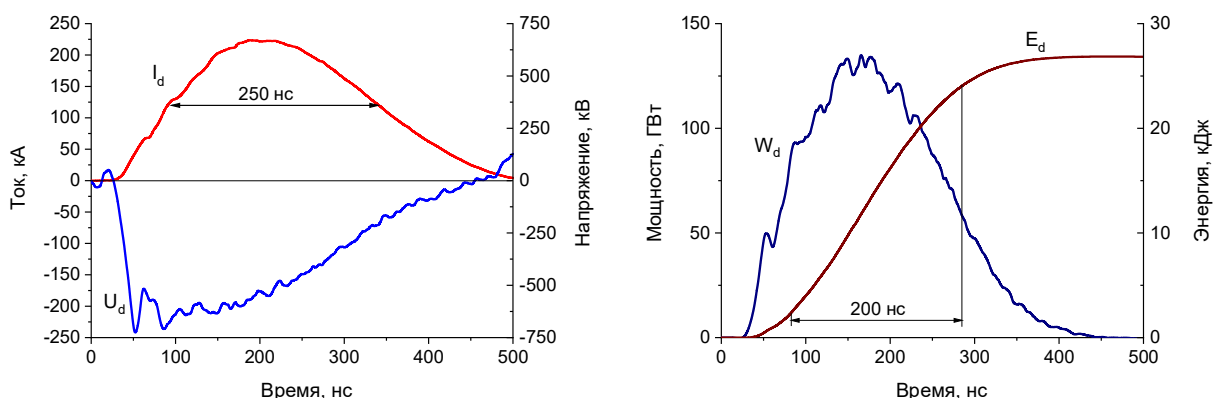


Рисунок 12 – Осциллограммы тока разряда I_d генератора в составе двух модулей из двенадцати ЛТД ступеней на электронный диод, напряжения на диоде U_d , мощности W_d и энергии E_d , выведенной в диоде, при зарядном напряжении ЛТД ступеней 95 кВ

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 [16]. 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 выполнено сравнение генератора на основе двух модулей из двенадцати ЛТД ступеней для лазерной системы ГНЛ-100 с ранее созданным генератором на основе субмикросекундных ЛТД ступеней [16]. 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.

Шестой раздел посвящен ЛТД модулю для мультимегаамперного генератора тока.

Для проекта мультимегаамперного генератора тока создана ЛТД ступень с изоляцией воздухом атмосферного давления с запасаемой энергией 17.3 кДж при зарядном напряжении 95 кВ (рисунок 13). 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. Ступень содержит емкостной накопитель энергии из 24-х секций 160 нФ, включенных параллельно. Секции разбиты на четыре идентичных сегмента по шесть секций в каждом. Четыре сегмента расположены по сторонам опорной плиты и прикреплены к плите низковольтной стороной с помощью болтовых соединений. Отсоединив болтовое соединение между основаниями сегмента и ступени, можно извлечь сегмент для ревизии. В центральной части ступени расположен ферромагнитный сердечник. Сердечник монтируются на опорном стальном кольце, к которому крепятся сборные электроды ступени. Стальное кольцо является внешним электродом выходной коаксиальной линии ЛТД ступени. Габаритные размеры ступени 2990 мм × 3558 мм × 210 мм, вес – около 2.5 т.

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. В нагрузку выводится энергия с пиковой мощностью ≈ 40 ГВт за характерное время ≈ 300 нс (рисунок 14). Эта ступень является самой мощной и энергоемкой из ЛТД ступеней с воздушной изоляцией на момент выполнения работы.

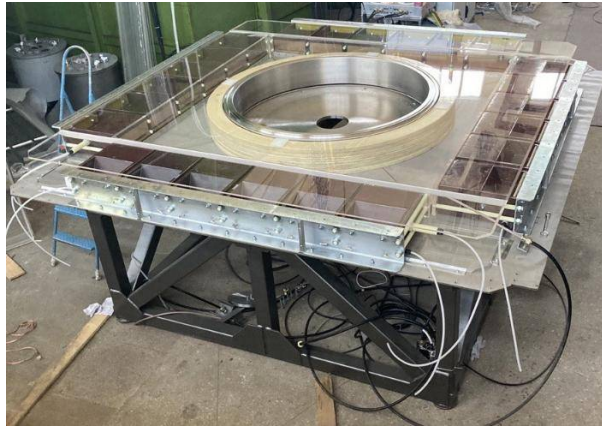


Рисунок 13 – Фотографии ЛТД ступени без верхней плиты в процессе монтажа в горизонтальном положении

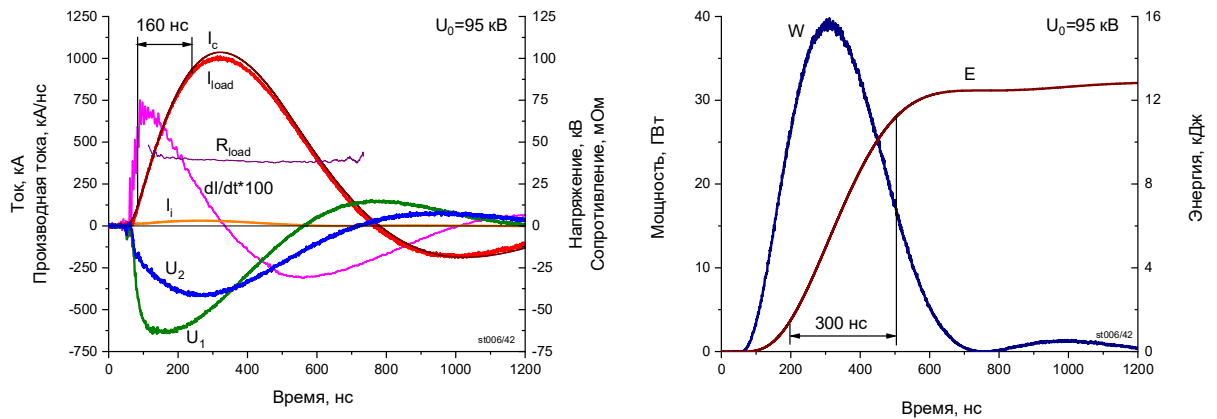


Рисунок 14 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда ЛТД ступени на нагрузку $R_{load}=0.04$ Ом при зарядном напряжении $U_0=95$ кВ

В испытаниях наработка ЛТД ступени составила более 400 импульсов. Основная часть импульсов выполнена при зарядном напряжении $U_0=90$ кВ и 95 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.

В численном моделировании разряда ЛТД ступени составлен баланс распределения энергии по ее элементам. Так, например, для режима разряда на нагрузку $R_{load}=0.04$ Ом, в котором получена максимальная мощность, 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 %.

После успешного завершения исследования единичной ЛТД ступени создан и запущен ЛТД модуль сначала в составе двух, а затем пяти ЛТД ступеней (рисунок 15).



Рисунок 15 – Модуль в составе двух (слева) и пяти (справа) ЛТД ступеней в горизонтальном положении

Экспериментальные данные показывают, что последовательное включение ступеней и соответствующее кратное увеличение сопротивления нагрузки по сравнению с сопротивлением для единичной ступени обеспечивает почти пропорциональное 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 $R_{load}=0.088$ Ом (рисунок 16) реализуется пиковая мощность ≈ 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 ≈ 150 нс; время вывода энергии в нагрузку по уровню (0.1–0.9) от максимального значения составляет ≈ 300 нс. При разряде модуля в составе пяти ЛТД ступеней с зарядным напряжением 90 кВ на нагрузку с сопротивлением $R_{load}=0.25$ Ом (рисунок 17) реализуется пиковая мощность ≈ 190 ГВт при амплитуде тока и напряжения в нагрузке 0.83 МА и 230 кВ, соответственно.

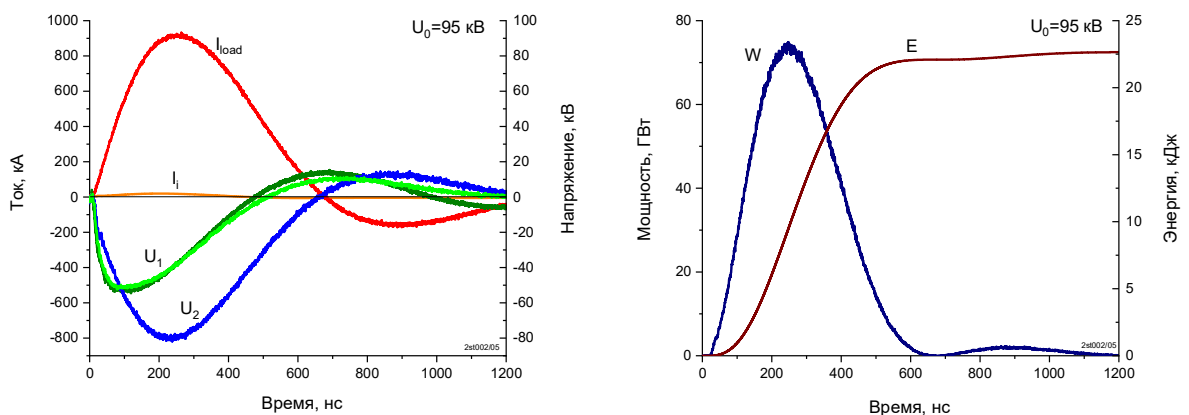


Рисунок 16 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда модуля из двух ЛТД ступеней на нагрузку $R_{load}=0.088$ Ом при зарядном напряжении $U_0=95$ кВ

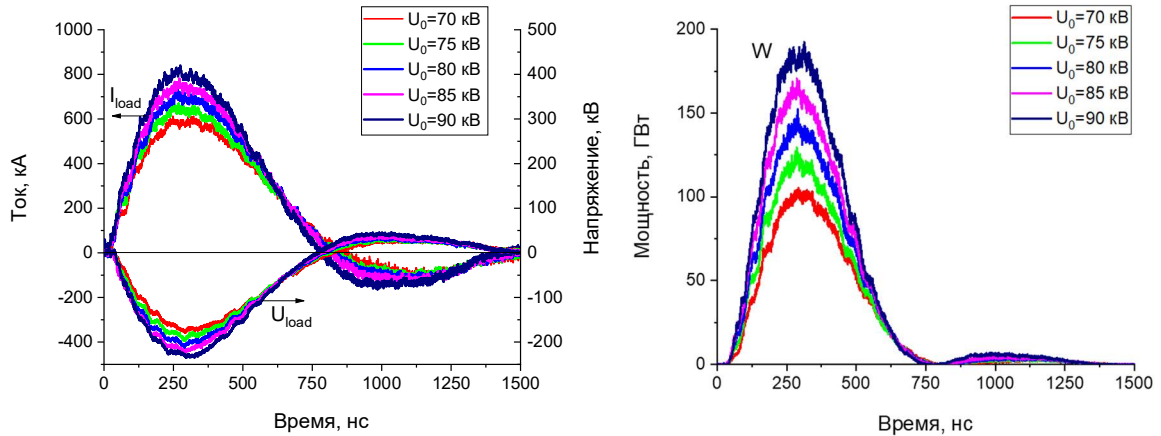


Рисунок 17 – Экспериментальные осциллограммы и расчетные кривые разряда модуля из пяти ЛТД ступеней на нагрузку $R_{load}=0.25$ Ом при зарядном напряжении $U_0=70–90$ кВ: U_{load} , I_{load} – амплитуды напряжения и тока нагрузки; W – выходная мощность модуля

В испытаниях наработка модуля из двух ЛТД ступеней составила более 350 импульсов. Основная часть импульсов выполнена при зарядном напряжении $U_0=90$ кВ и 95 кВ. Наробotka модуля из пяти ЛТД ступеней составила более 100 импульсов. Также, как и для единичной ступени получена точность включения с джиттером в единицы наносекунд. Среднеквадратичное отклонение амплитуды выходного импульса модуля составило единицы процентов от среднего значения и обусловлено главным образом нагревом жидкостной нагрузки.

На основе созданной ЛТД ступени разработан проект ЛТД установки с амплитудой тока более 8 МА и фронтом импульса 200–300 нс в нагрузке типа лайнер плоской геометрии. Модуль в составе двенадцати ЛТД ступеней для проекта мультимегаамперной ЛТД установки спроектирован, изготовлен, собран и подготовлен к испытаниям (рисунок 18).



Рисунок 18 – Модуль в составе двенадцати ЛТД ступеней с передающей линией

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. В **седьмом 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 задачи;

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

3) Низкое волновое сопротивление разрядного контура ЛТД генераторов (~ 1 Ом) делает возможным создание мощных низкоомных источников СВЧ-излучения;

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. Это делает возможным, например, формировать на нагрузке два последовательных импульса напряжения с контролируемой задержкой по времени для улучшения характеристик диода со взрывоэмиссионным катодом. 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.

Создан генератор прямого действия с током более 0.5 МА. Генератор содержит двадцать четыре параллельно включенные секции 80 нФ (рисунок 19). Секции объединены в четыре идентичные сборки, по шесть секций в каждой сборке. Сборки размещены по двум сторонам от области нагрузки. При работе на нагрузку с индуктивностью 17.5 нГн амплитуда тока генератора достигает 590 кА, время нарастания тока около 400 нс. Генератор поставлен в Технион – Израильский технологический институт в Хайфа, Израиль.

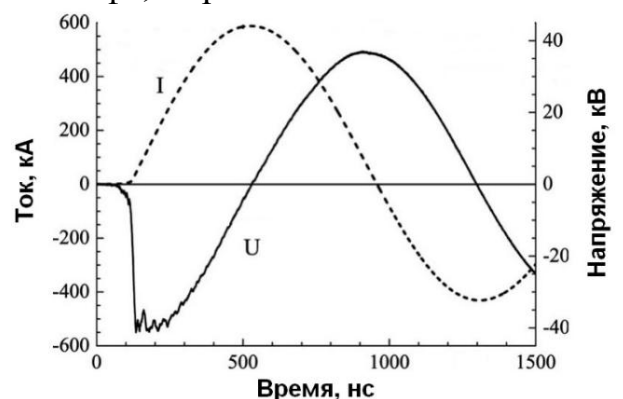
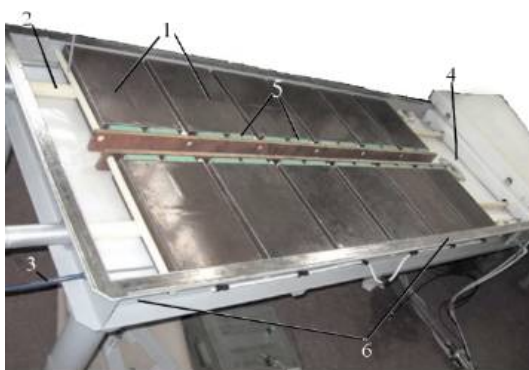


Рисунок 19 – Слева: Субмикросекундный генератор тока: 1– секции; 2– высоковольтный ввод зарядного напряжения; 3– пусковой проводник; 4– область нагрузки; 5– демпфирующие резисторы; 6– корпус генератора. Справа: Напряжение и ток в индуктивной нагрузке 17.5 нГн при зарядном напряжении генератора 80 кВ

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 20), созданный в компании ITHPP (Франция) на основе секций ИСЭ СО РАН [17]. Генератор состоит из 17 последовательно включенных ЛТД ступеней; единичная ступень содержит два секции 16 нФ. Генератор может работать в режиме как отрицательной, так и положительной полярности импульса выходного напряжения. 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 ≈ 90 нс, а длительность импульса тормозного рентгеновского излучения ≈ 30 нс.

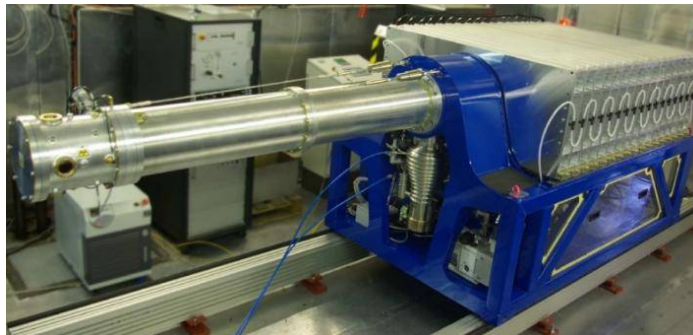


Рисунок 20 – ЛТД генератор в составе 17 ступеней для целей радиографии [17]

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 (рисунок 21).

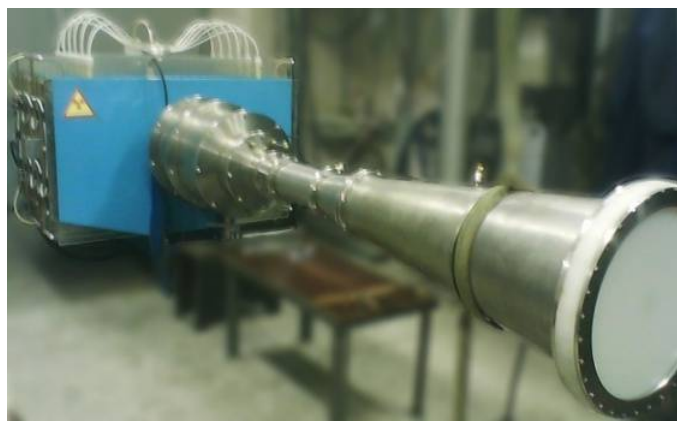


Рисунок 21 – Фотография источника СВЧ-излучения

Для генерации радиального электронного пучка используется цилиндрический диод со взрывоэмиссионным катодом. При амплитуде напряжения на диоде 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

достигает 27 кА за 150 нс. Сопротивление диода к моменту максимума тока выходит на квазипостоянный уровень около 10 Ом, который сохраняется в течение ≈ 300 нс. В источнике получена одномодовая генерация СВЧ излучения с импульсной мощностью 250 МВт на частоте 2.2 ГГц при длительности импульса 130 нс.

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. 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). Исследован подход, связанный с использованием эффекта двойного импульса, применительно к источнику сильноточного электронного пучка субмикросекундной длительности на основе ЛТД генератора.

Схема источника со взрывоэмиссионным катодом и вспомогательным вакуумным разрядом, формируемым предымпульсом, приведена на рисунке 22. 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 . Основной емкостной накопитель энергии ступени выполнен из одной секции 80 нФ. Предымпульс в ЛТД ступени формируется специально разработанной секцией с емкостным накопителем 3.2 нФ. 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 с контролируемой задержкой по времени t_d . На конце выходная линия ЛТД генератора линии установлен электронный диод, образованный лезвийным катодом и плоским анодом.

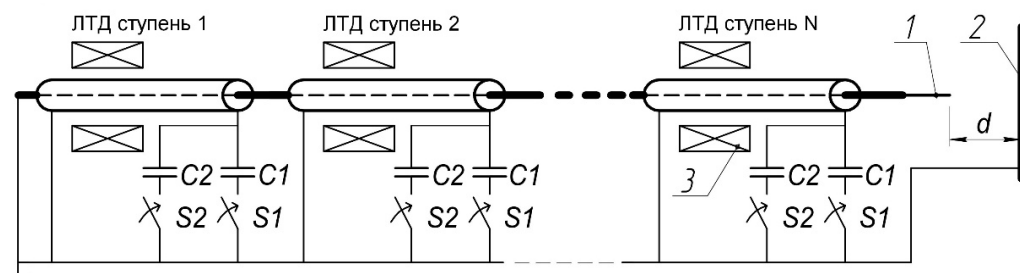


Рисунок 22 – Схема электронного источника на основе ЛТД генератора с двойным импульсом напряжения: 1– лезвийный катод; 2–анод диода; 3– ферромагнитный сердечник ступени

Осциллограммы и расчетные кривые, демонстрирующие работу ЛТД генератора, показаны на рисунке 23. В варианте генератора с шестью ЛТД ступенями амплитуды напряжения предимпульса и основного импульса составляют 150 кВ и 300 кВ, соответственно. В отсутствии предимпульса 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 ~ 0.1 кА/нс. За счет предимпульса 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 предимпульса в диод передается около 1 кДж с эффективностью 65 %. С помощью тепловизионной диагностики было выполнено исследование влияния предимпульса на распределение плотности энергии пучка на аноде. Предимпульс приводит к уширению пучка в поперечном направлении. В продольном направлении значительных отличий в распределении плотности энергии на аноде не наблюдается.

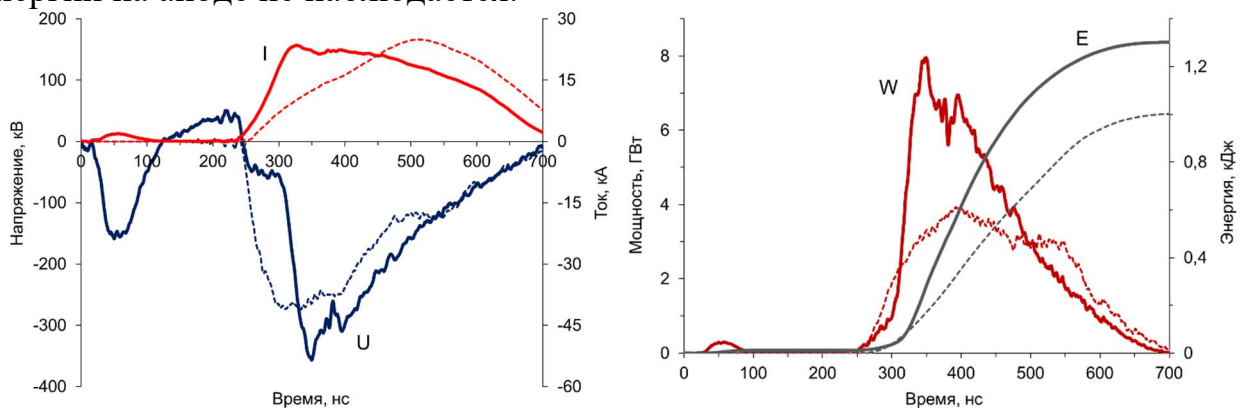


Рисунок 23 – Осциллограммы тока I , напряжения U , мощности W и энергии E без предимпульса (пунктирные линии) и с предимпульсом (сплошные линии) при разряде ЛТД генератора с шестью ступенями. Время задержки основного импульса относительно предимпульса $t_d=250$ нс.

В другом возможном варианте источника сильноточного электронного пучка со взрывоэмиссионным катодом для предварительного плазменного заполнения ускоряющего зазора в диоде используются дополнительные электроды вспомогательного разряда и отдельный генератор для питания этого разряда со своей системой зарядки и запуска. Схема такого источника на основе ЛТД генератора и плазмонаполненного диода показана на рисунке 24. На конце линии ЛТД генератора (1) установлен полый цилиндрический катод диаметром 10 мм (2), внутри которого размещается источник плазмы капиллярного типа. Питание к источнику плазмы подводится от отдельного генератора C_1 по проводнику (3) внутри центрального проводника вакуумного коаксиала.

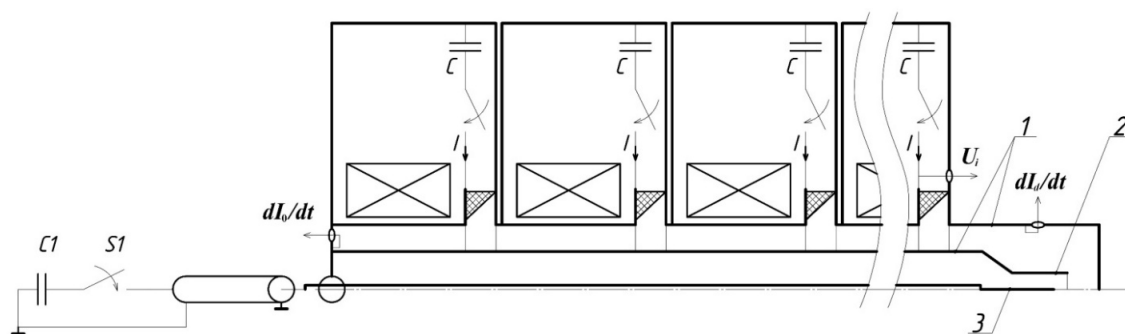


Рисунок 24 – Схема электронного источника на основе ЛТД генератора и плазмонаполненного диода: 1 – вакуумная коаксиальная линия; 2 – электрод источника плазмы и потенциальный (катодный) электрод диода; 3 – потенциальный электрод источника плазмы

Основной цикл работ по исследованию электронного источника на основе ЛТД генератора и плазмонаполненного диода выполнен на генераторе с шестью ступенями, показанном на рисунке 10. Отличительной особенностью плазмонаполненного диода является способность работать как прерыватель тока, увеличивая выходную мощность питающего ЛТД генератора за счет повышения напряжения. Разряд ЛТД генератора с шестью ступенями на плазмонаполненный диод иллюстрирует рисунок 25. На представленной осциллограмме тока разряда 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 диоде рассеивается энергия $E_d \approx 5$ кДж. Эффективность передачи энергии из емкостного накопителя ЛТД генератора в плазмонаполненный диод составляет более 60%. В высокоомной фазе в диоде формируется электронный пучок диаметром около 1 см со средней плотностью мощности на аноде $\sim 10^{10}$ Вт/см². 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 ~ 1 Р.

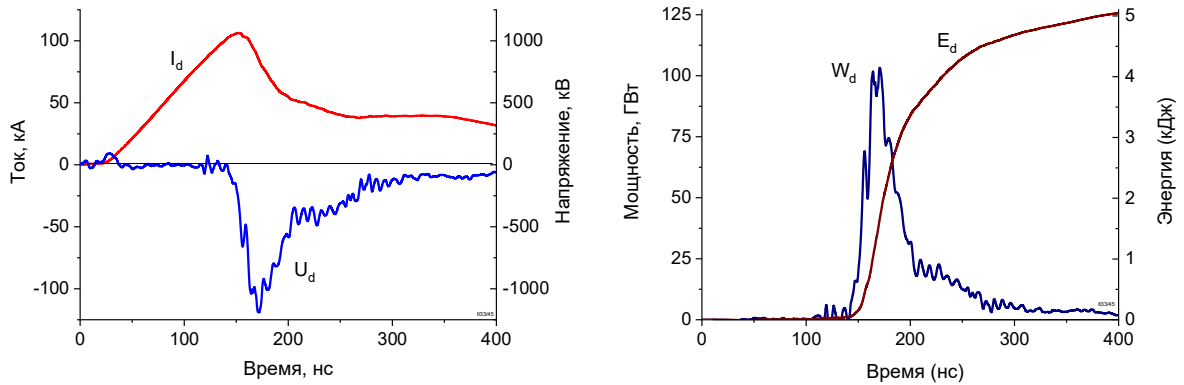


Рисунок 25 – Осциллограммы тока I_d , напряжения U_d , мощности W_d и энергии E_d при разряде ЛТД генератора на плазмонаполненный диод. Зарядное напряжение 90 кВ

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 для линейно нарастающего сопротивления диода со скоростью k , согласно которому амплитуда напряжения на диоде и пиковая мощность рассеивания энергии в диоде определяются как:

$$U_m \sim \sqrt{E_0} \sqrt{k}, \quad (1)$$

$$W_m \sim E_0 \sqrt{\frac{k}{L}}, \quad (2)$$

где E_0 – запасаемая энергия в индуктивности контура; L – индуктивность контура.

Возможность увеличения мощности плазмонаполненного диода только за счет параметров питающего генератора без изменения параметров создаваемого плазменного канала была экспериментально показана в цикле работ, в которых 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 плазмонаполненного диода для указанных режимов обобщены в виде зависимостей напряжения на диоде U_d от запасаемой магнитной энергии E_0 и мощности диода W_d от отношения запасаемой энергии к индуктивности контура $E_0/(L)^{1/2}$ (рисунок 26). Помимо экспериментальных данных на рисунках также приведены графики аналитических функций (пунктирные линии). Видно, что зависимости (1) и (2) 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 27).

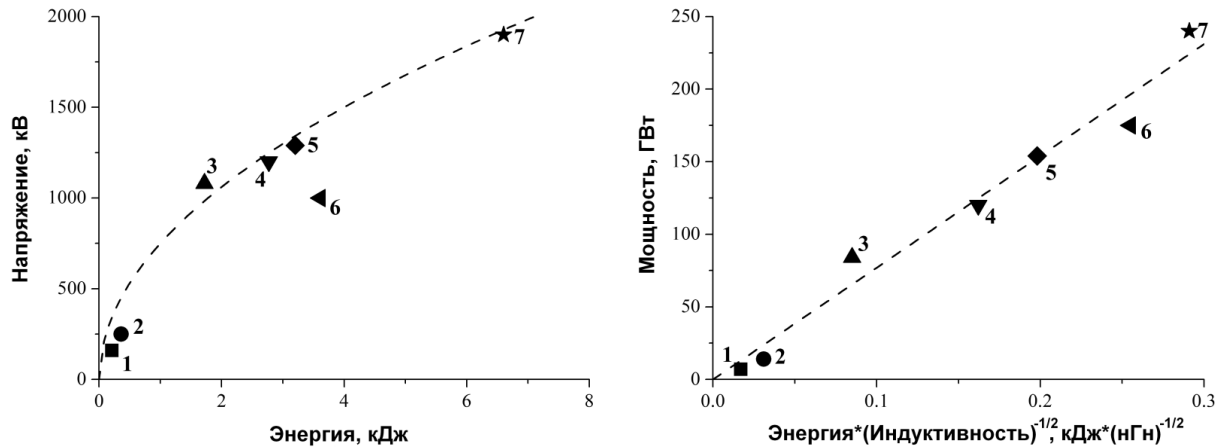


Рисунок 26 – Слева: Экспериментальные значения напряжения на диоде U_d в зависимости от запасаемой энергии E_0 . Пунктирная линия – расчетная кривая $U_d = \text{const} \times (E_0)^{1/2}$. Справа: Экспериментальные значения пиковой мощности диода W_d в зависимости от отношения запасаемой энергии к индуктивности контура $E_0/(L)^{0.5}$. Пунктирная линия – расчетная кривая $W_d = \text{const} \times E_0/(L)^{1/2}$

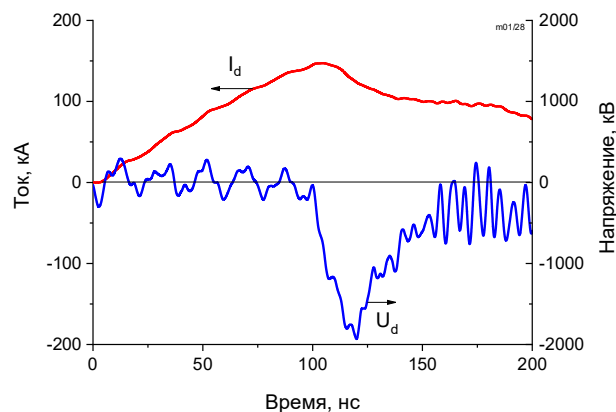


Рисунок 27 – Осциллограммы тока I_d и напряжения U_d плазмонаполненного диода

В заключение диссертации приведены основные результаты работы.

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 секций с изоляцией воздухом атмосферного давления не превышает временной постоянной секций ЛТД ступеней с масляной изоляцией.

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 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 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 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 полувысоте 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.

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.

Также в заключении автор выражает благодарность тем, кто оказал помощь и поддержку в работах по теме диссертации.

Цитированная литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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).
5. 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).
6. Batrikov, A.N. Primary energy storages based on linear transformer stages / A.N. Batrikov, 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.

7. 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.
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. 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.
10. 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.
11. Smith, I.D. Induction voltage adders and the induction accelerator family // Phys. Review ST – Accelerators and Beams – 2004. – 7. – 064801.
12. 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. 13th IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Las Vegas, USA. – 2001. – P.1491-1494.
13. 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. 16th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA. – 2007. – P.148-151.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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. 20th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Austin, USA. – 2015. – DOI: 10.1109/PPC.2015.7296972.

Список публикаций по теме диссертации с участием автора

1. 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.
2. Kovalchuk, V.M. Pulsed generators based on air-insulated linear-transformer-driver stages / V.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, E.V. Kumpyak, A.A. Zherlitsyn // Phys. Rev. ST Accel. Beams. – 2013. – V.16. – P. 050401.
3. 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.
Zherlitsyn, A.A. Capacitor units with air insulation for linear transformers / A.A. Zherlitsyn, V.M. Kovalchuk, G.V. Smorudov // Instruments and Experimental Techniques. – 2009. – Vol.52, No.6. – P.802–813.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Жерлицын, А.А. Увеличение эффективности вывода энергии в электронный диод за счет вспомогательного разряда, генерируемого предымпульсом / 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.
10. 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. 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE), Tomsk, Russia – 2018, P.107-112. DOI: 10.1109/ISHCE.2018.8521208.
 11. 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.
 12. 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. 16th Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk, Russia. – 2010. – P.261-264.
 13. Kharlov, A.V. Electron accelerator for pumping of the Xe₂ lamp / A.V. Kharlov, B.M. Kovalchuk, S.N. Volkov, A.A. Zherlitsyn, A.N. Batrikov, V.B. Zorin, V.N. Kiselev, G.V. Smorudov and N.V. Tsoy // 16th Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk, Russia. – 2010. – P.7-10.
 14. Kovalchuk, B.M. Electron-beam accelerator for pumping of a Xe₂ 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.
 15. 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 // 15th Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk. – 2008. – P.296-298.
 16. 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.
 17. Козырев, А.В. Оптимизация передачи энергии из LC-контура в кинетическую энергию металлической токонесущей пластины / А.В. Козырев, А.А. Жерлицын // Proc. 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2022). – 2022. – С.426-429. DOI: 10.56761/EFRE2022.S4-P-035203.
 18. 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.
 19. 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.

20. 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. 25th Intern. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Tomsk, Russia. – 2012. – P.425-428.
21. 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.
22. Zherlitsyn, A.A. Foil-less plasma-filled diode / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin // Proc. 5th Euro-Asian Pulsed Power Conf. Kumamoto, Japan, September 8–12, 2014. – P.478-480.
23. 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.
24. Zherlitsyn, A.A. Pulsed current generator with variable pulse shape / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, E.V. Kumpyak // Proc. 14th Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk, Russia. – 2006. – P.287-289.
25. 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. 16th Intern. Symp. High Current Electronics, Tomsk. – 2010. – P.423-426.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. Zherlitsyn, A.A. Electron accelerator with plasma-filled diode / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin // Proc. 16th Intern. Symp. on High Current Electronics, Tomsk, Russia. – 2010. – P.269-272.
31. 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.
32. 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.

- 19th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams, Karlsruhe, Germany. – 2012. – P.184-187.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. Belomytsev, S.Ya. Megavolt range voltage measurement in vacuum through a short-circuited line / S.Ya. Belomytsev, A.A. Grishkov, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin, A.A. Zherlitsyn // Rev. Sci. Instrum. – 2011. – 82. – 104702.
37. 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.
38. Zherlitsyn, A.A. Plasma-filled diode power increase / A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin // Proc. 5th Euro-Asian Pulsed Power Conf. Kumamoto, Japan. – 2014. – P.481-484.
39. 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.
40. 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.