Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Курапов Григорий Николаевич

КОММУТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДНИКОВ СО СЖАТЫМ ГАЗОМ ДЛЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НИЗКОИМПЕДАНСНЫХ ФОРМИРУЮЩИХ ЛИНИЙ

Специальность 1.3.18. «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»
Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ремнёв Геннадий Ефимович

Томск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ 16

1.1 Высоковольтные коммутаторы. Области применения и основные требования к параметрам 16

1.2 Рабочая среда в коммутаторах 17

1.3 Модели формирования газового разряда, процессы происходящие в разряднике 22

1.4 Основные параметры и характеристики искровых разрядников 26

1.5 Коммутаторы со сжатым газом 37

1.6 Выводы по главе 56

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ 59

2.1 Малогабаритный, мощный импульсный ускоритель на основе низкоимпедансной двойной формирующей линии с рабочим напряжением 160 кВ 59

2.2 Расчет электрического поля и индуктивности разрядника 65

2.3 Измерение коммутационных характеристик разрядника 69

2.4 Конструкция разрядника со сжатым газом для коммутации низкоимпедансной коаксиальной линии напряжением до 160 кВ 71

2.5 Выбор материала и формы изолятора для достижения требуемых прочностных параметров и минимизации индуктивности 76

2.6 Расчет механической прочности изолятора 78

2.7 Схемотехническое исполнение экспериментального стенда для параллельной коммутации серийных разрядников серии РО-43 82

2.8 Выводы по главе 84

ГЛАВА 3. КОММУТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОГО РАЗРЯДНИКА СО СЖАТЫМ ГАЗОМ ПРИ КОММУТАЦИИ НИЗКОИМПЕДАНСНОЙ ФОРМИРУЮЩЕЙ ЛИНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 160 КВ 87

3.1 Обоснование выбора рабочей атмосферы высоковольтного разрядника со сжатым газом 88

3.2 Влияние газовой атмосферы на многоканальность коммутации трехэлектродного разрядника 92

3.3 Коммутационные характеристики трехэлектродного разрядника в зависимости от газовой атмосферы 97

3.4 Коммутационные характеристики трехэлектродного разрядника в зависимости от положения среднего электрода 102

3.5 Выводы по главе 107

ГЛАВА 4. РАЗБРОС ВРЕМЕНИ КОММУТАЦИИ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ДВУХЭЛЕКТРОДНЫХ РАЗРЯДНИКОВ СО СВЕРХСЖАТЫМ ГАЗОМ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИИ 109

4.1 Параллельная коммутация разрядников-обострителей серии РО-43 при соединении с ДФЛ через кабельные линии 110

4.2 Параллельная коммутация разрядников-обострителей серии РО-43 при обострении импульса напряжения непосредственно на выходе с ДФЛ 113

4.3 Выводы по главе 118

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 120

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 122

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации 136

ПРИЛОЖЕНИЯ 139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Согласно определенным в последние годы приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации таких как переход к персонализированной, предиктивной и профилактической медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям здоровьесбережения, а также вектору развития атомной и ядерной промышленности и ее применения серьезный толчок в развитии наблюдается в области ускорительной техники. Данная научно-исследовательская работа также лежит в рамках проекта государственного задания по теме: Импульсный ускоритель легких ионов для реализации ядерно-физических технологий (FSWW-2025-0002). Данный проект направлен на создание мощного импульсного наносекундного ускорителя для практического использования. Отличительной особенностью данного типа ускорителей является высокий темп ускорения, что позволяет использовать маленький объем рабочей камеры и достаточно неглубокий вакуум на уровне 10^{-4} Торр. В совокупности это позволяет изготавливать их компактными и относительно дешёвыми.

Несмотря на широкий потенциал практического использования импульсных ускорителей ионов, главной не решенной задачей, сдерживающей их развития, являются достаточно низкий ресурс работы ускорителя в целом. В связи с этим работы, направленные на исследование и разработку узлов, обеспечивающих высокий ресурс работы ускорителя актуальны. Одним из узлов ускорителя, определяющим его ресурс и требующим проведения дополнительных исследований является коммутатор низкоомных формирующих линии.

От основного коммутатора, запускающего процесс формирования импульса напряжения зависит не только ресурс работы ускорителя в целом, но и сразу несколько ключевых характеристик таких как длительность фронта импульса ускоряющего напряжения, КПД генератора и др. В данных ускорителях основной коммутирующий узел должен обеспечивать коммутацию напряжения на уровне

10^5-10^6 В, со скоростью нарастания тока не ниже 10^{12} А/с для обеспечения фронта генерируемого импульса напряжения на уровне 10 – 15 нс, при импедансе коммутируемой линии на уровне единиц Ом. Однако для достижения фронта импульса напряжения, генерируемого формирующей линией в несколько наносекунд необходимо использование обостряющего разрядника, устанавливаемого на выходе формирующей линии. При этом данный разрядник должен обладать низкой индуктивностью, высоким временем коммутации, менее 1нс, и разбросом срабатывания по напряжению на уровне 1%.

Единственным типом коммутаторов способных справиться с этими задачами на сегодняшний день являются искровые газовые разрядники со сжатым газом. Искровые разрядники находят широкое применение в различных областях современных науки и техники, в качестве составных частей установок, работающих в медицине, связи, измерительной технике генераторах мощных СВЧ импульсов, ускорительной технике, ядерной и экспериментальной физике, транспорте, генераторах ЭМИ и т.п.

Распространение газовых искровых разрядников в промышленности и исследовательских целях вызвано их преимуществами относительно других электронных и газоразрядных приборов аналогичного назначения:

- отсутствие в составе накаливаемых частей;
- готовность к работе практически мгновенно после включения;
- высокая надёжность;
- работоспособность при изменении окружающей среды в широком диапазоне температур;
- практически полная невосприимчивость к радиации;
- возможность пропускания тока как в прямом, так и в обратном направлениях;
- простота конструкции и технологии производства, а также невысокая стоимость изготовления по сравнению с другими типами коммутаторов;
- малый вес и габариты.

Проблема создания разрядника с необходимыми характеристиками существует с момента начала исследования импульсных высоковольтных ускорителей. Существует достаточно большое количество научных работ по тематике начиная с 60-х годов прошлого века. Большое внимание проблеме коммутаторов уделяли в своих работах, в частности, академик Месяц Г.А. в работах «Генерирование мощных наносекундных импульсов» и «Импульсная энергетика и электроника», Ковальчук Б.М. и др. в работе «Сильноточные наносекундные коммутаторы» и другие ученые. В настоящее время существуют предложения по продаже коммерческих изделий, рассчитанных на напряжения от десятков до нескольких сотен киловольт, с параметрами по ресурсу и допустимой энергии недостаточными для требуемых задач.

Из всех типов известных на сегодняшний день газовых разрядников наиболее подходящими в качестве основного коммутатора формирующей линии являются трехэлектродные разрядники с искажением поля, позволяющие снизить индуктивность искрового канала и его омическое сопротивление за счет многоканальной коммутации. Это дает возможность говорить о их способности обеспечить требуемую скорость нарастания тока и снизить омические потери в разряднике. Помимо этого, многоканальная коммутация обеспечивает снижение эрозии основных электродов разрядника, что в свою очередь увеличивает его ресурс. Однако известные данные не дают однозначной картины конструкции разрядника, позволяющей обеспечить необходимый режим работы.

Так же для низкоомных формирующих линий перспективным видится использование в качестве обостряющих коммутаторов, выпускаемых промышленностью двух электродных разрядников со сверхсжатым газом. Преимуществом данных разрядников является высокая скорость коммутации на уровне сотен пикосекунд и низкий разброс срабатывания. Существенным их недостатком является достаточно низкая коммутируемая энергия. Однако низкий разброс срабатывания по напряжению и высокая скорость коммутации позволяет сделать предположение о возможности их параллельного включения.

Все выше сказанное позволяет говорить о необходимости проведений работ, направленных на совершенствование конструкции разрядников для мощных импульсных наносекундных ускорителей, основанных на низкоомных формирующих линиях.

Данная научно-исследовательская работа нацелена на разработку конструкции неуправляемого высоковольтного многоканального разрядника со сжатым газом для коммутации формирующих линий сильноточных наносекундных ускорителей со средней мощностью более 1 кВт. А также получение научно-технического обоснования возможности параллельной работы серийно производимых разрядников со сверхсжатым газом

Цель диссертационной работы – Разработка конструкции неуправляемого высоковольтного многоканального разрядника со сжатым газом для коммутации формирующих линий сильноточных наносекундных ускорителей со средней мощностью более 1 кВт, обеспечивающего скорость нарастания тока не ниже 2×10^{12} А/с при работе в диапазоне коммутируемых напряжений 100÷500 кВ.

Получение научно-технического обоснования возможности параллельной работы серийно производимых разрядников со сверсжатым газом серии РО-43 в качестве обострителя импульса генерируемого низкоимпедансной коаксиальной формирующей линией.

Задачи исследования

1. Разработка оптимального конструктивного исполнения разрядника, обеспечивающего предельно низкую индуктивность разрядного контура – до 20нГн, с частотой следования более 1Гц.

2. Исследование многоканальности трехэлектродного разрядника, изучение коммутационных характеристик и стабильности срабатывания разрядника.

3. Исследование коммутационных характеристик в зависимость от состава газовой атмосферы, давления газа, конфигурации и расположения электродов в искровом зазоре.

4. Проведение работ по выбору материала и формы изолятора для достижения необходимой электрической прочности, обеспечивающих увеличение ресурса работы разрядника.

5. Исследование разброса времени коммутации разрядников-обострителей со сверхсжатым газом серии РО-43 при их параллельной коммутации.

Научная новизна

1. Показано, что использование в газовом трехэлектродном разряднике с предразразрядником атмосферы азота с добавлением 10% элегаза при коммутации низкоимпедансной коаксиальной формирующей линии сопротивлением менее 5 Ом, коммутируемом напряжении более 100 кВ, обеспечивает многоканальный пробой основных искровых промежутков с наименьшим разбросом по количеству каналов.

2. Установлено, что использование в трехэлектродном разряднике со сжатым газом наполненного смесью, состоящей из 90% N_2 и 10% SF_6 с избыточным давлением более 2 атм, тонкого среднего электрода толщиной менее 1мм расположенного между заземленным и высоковольтным электродами при коммутации тока более 30 кА, со скоростью нарастания напряжения более 10^{12} В/с обеспечивает формирование 7 и более искровых каналов в каждом из 2-х промежутков.

3. Впервые установлена возможность параллельной работы двухэлектродных разрядников-обострителей со сверхсжатым газом серии РО-43 при скорости нарастания напряжения на зазоре более 10^{12} В/с и коммутируемой энергии до 25 Дж.

Практическая значимость работы

1. Разработана конструкция неуправляемого разрядника для коммутации емкостного накопителя на основе низкоимпедансной формирующей линии, используемого в ускорителе легких ионов.

2. Разработан и успешно введен в эксплуатацию опытный малогабаритный стенд-ускоритель для отработки узлов промышленного ускорителя проектируемого в рамках выполнения государственного задания (FSWW-2025-0002)

3. Даны рекомендации по модернизации разрядника опытного ускорителя на базе коаксиальных формирующих линий с рабочим напряжением до 500 кВ.

4. Определены предельные коммутационные характеристики неуправляемых разрядников-обострителей со сверхсжатым газом серии РО-43 и возможность их параллельной коммутации в качестве нагрузки низкоимпедансной коаксиальной линии сопротивлением 10 Ом.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Наименьший разброс количества искровых каналов, возникающих при пробое основных искровых промежутков в газовом трехэлектродном разряднике с предразразрядником при коммутации низкоимпедансной коаксиальной формирующей линии сопротивлением ≈ 4,5 Ом и заряженной до 80кВ обеспечивает использование атмосферы азота с добавлением 10% элегаза. Разброс количества каналов составляет 20%.

2. Импульсный пробой трехэлектродного разрядника в смеси элегаза с азотом, при концентрации элегаза равной 10%, со скоростью нарастания коммутируемого напряжения более 10^{12} В/с, коммутируемым током более 30 кА и тонким средним электродом, расположенным в эквипотенциальной области с острой кромкой в зоне максимальной напряженности электрического поля, носит многоканальный характер.

3. Разброс времени срабатывания разрядников-обострителей со сверхсжатым газом серии РО-43 при параллельной работе со скоростью нарастания напряжения более 10^{12} В/с и коммутируемой энергии ≈ 25 Дж не превышает 2 нс.

Методология и методы исследования

Электрическая прочность высоковольтного трехэлектродного разрядника со сжатым газом вычислялась методами численного моделирования распределения электрического поля и напряженности ограниченных корпусом газового разрядника. Для проведения расчетов применялся итерационный метод, который положен в основу работы программного комплекса ELCUT. В дальнейшем проводилась экспериментальная проверка полученных расчётных результатов подачей импульса напряжения с амплитудой до 200 кВ.

Диагностическое оборудование подвергалось калибровке, которая показала, что все оборудование отражает работу ускорителя корректно как в режиме короткого замыкания, так и при работе на резистивную нагрузку 10 Ом (ускоряющее напряжение до 200 кВ). Измерение напряжения проводилось двухкаскадным делителем напряжения. Первый каскад жидкостный, второй – резистивный. Расположение делителя близко к корпусу разрядника позволяет считать погрешность измерения напряжения пренебрежительно малой величиной. Полный ток измерялся поясом Роговского откалиброванным на отображение импульса с фронтом 2 нс и длительностью 250 нс. Диагностическое оборудование, используемое в исследованиях, позволяет определять величину напряжения и тока с погрешностью не хуже 10%.

Время коммутации искрового газового разрядников определялось теоретическими методами по известным закономерностям развития искрового разряда в газовой среде и экспериментальными методами по отработанной методике проведения измерений высоковольтных импульсов с субнаносекундным разрешением.

Достоверность результатов исследований обеспечивалась использованием аттестованного и лицензированного измерительного и аналитического оборудования. Методики измерения параметров высоковольтных искровых разрядников и их отдельных узлов, соответствуют рекомендациям данным в научно-технической литературе и современным экспериментальным методам.

Систематический характер исследований, непротиворечивость полученных данных и их согласие с результатами других исследователей, а также высокая степень совпадения расчётных и экспериментальных данных подтверждают достоверность результатов. Результаты, полученные в ходе исследования, не противоречат научным фактам, известным из литературного обзора. Основные выводы научной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах и нескольких профильных международных конференциях.

Внедрение результатов

Результаты диссертационной работы использованы в следующих грантах:

1. Грант РНФ № 23-19-00614 Научно-техническое обоснование создания источника нейтронов на базе импульсного ускорителя легких ионов.
2. Госзадание FSWW-2025-0002, номер 226013025556-5. Импульсный ускоритель легких ионов для реализации ядерно-физических технологий.

Аппробация работы

Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на профильных международных конференциях: 16–й Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (16th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications» GDPA – 2023) 18 – 23 Сентября 2023 года в г. Уфа, IX Международном конгрессе по энергетическим потокам и радиационному воздействию (9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2024) 16 – 21 сентября 2024 года, г. Томск, 17–й Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (17th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications» GDP 2025) 8 Сентября – 12 Сентября 2025 года в г. Екатеринбург, на Международной научно-технической конференции «Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений для фундаментальных и прикладных исследований» 29 сентября – 3 Октября 2025 года

в г. Саров, и на X Международном конгрессе по энергетическим потокам и радиационному воздействию (10th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2026) 14 – 18 сентября 2026 года, г. Томск.

Личный вклад автора

Автором самостоятельно сформулированы цель и задачи необходимые для проведения научно-исследовательских работ, разработана методика и осуществлен выбор диагностического оборудования.

При непосредственном участии автора разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию высоковольтный импульсный источник питания генератора для испытаний разрядника (Патент RU №2810296) и коллективный ускоритель ионов (Патент RU № 2 860 974), одним из ключевых элементов которого является искровой трехэлектродный разрядник со сжатым газом. Также подана заявка на патент на изобретение: Неуправляемый газовый разрядник

Автором разработана конструкция, подготовлены 3D модели и конструкторская документация на экспериментальный стенд для испытаний искровых газовых разрядников, представляющий из себя высоковольтный генератор наносекундных импульсов на основе низкоимпедансной коаксиальной формирующей линии напряжением до 160 кВ.

Автор принимал активное и непосредственное участие при проведении необходимых расчетов, изготовлении, экспериментальных исследований коммутационных характеристик искрового трехэлектродного разрядника и двухэлектродных разрядников со сверхсжатым газом, а также в проведении анализа полученных результатов и обсуждении результатов, полученных в ходе этих работ. При непосредственном участии автора проходила подготовка научных статей и выступлений на конференциях.

Публикации

По теме диссертации включая статьи и тезисы докладов всероссийских и международных конференций опубликовано 15 печатных работ, из них 3 статьи в

журналах из перечня ВАК, 4 статьи индексируемых в базах Web of Science и Scopus, в т.ч. одна – 2 квартиля, 2 патента на изобретение (Приложение).

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка опубликованных работ по теме диссертации, списка использованной литературы и приложения. Материалы диссертации изложены на 140 страницах, содержат 58 рисунков и 3 таблицы. Список использованной литературы включает 122 наименования. В приложении приведены патенты.

Содержание работы

Во введении приведено обоснование актуальности проводимых исследований в рамках диссертационной работы и определена цель работы. Поставлены задачи исследования, сформулирована научная новизна полученных результатов, определены положения, выносимые на защиту, показана практическая значимость полученных результатов, а также представлен краткий обзор содержания диссертации.

В первой главе представлен обзор научной литературы, описывающий основные типы существующих коммутаторов, принципов их построения, расчетов основных параметров, а также их достоинства и недостатки. Обоснован выбор сжатого газа в качестве коммутирующей среды. Описано влияние состава газовой атмосферы, а также материалов корпуса и электродов на работоспособность и долговечность разрядников. Дано описание возникновения и развития искрового разряда в газе, приведены некоторые расчетные формулы основных его параметров и характеристик.

Во второй главе описывается схемотехническое исполнение ускорителя для исследования газового разрядника, приведены его основные параметры. Представлены основные характеристики систем, узлов, зондов и датчиков, используемых в составе экспериментального оборудования или оказывающих

влияние на исследуемый объект. Описана методика расчета основных характеристик разрядника, в том числе с применением специализированного программного комплекса по расчету и визуализации электрических полей. Приведена методика выбора материала, обоснование его размеров с учетом минимальной индуктивности, а также расчет прочностных характеристик основного изолятора отделяющего газовый объем разрядника от жидкостного объема формирующей линии. Представлена методология измерения и детектирования исследуемых параметров коммутатора. Представлены расчеты электрических полей, индуктивности разрядного контура. Описана конструкция исследуемого разрядника, принцип его работы и схемотехническое исполнение экспериментальной части, в том числе по параллельной коммутации обостряющих разрядников.

В третьей главе приведены результаты исследований по многоканальной коммутации трехэлектродного разрядника со сжатым газом экспериментального ускорителя при использовании в качестве накопителя энергии низкоиндуктивных коаксиальных формирующих линий с рабочим напряжением до 160 кВ. Обоснован выбор различных газов и газовых смесей для проведения исследований коммутационных характеристик трехэлектродного разрядника со сжатым газом. Представлены коммутационные характеристики трехэлектродного разрядника в зависимости от состава газовой атмосферы, наполняющей корпус разрядника, размеров и положения среднего электрода в междуэлектродном зазоре. Определено влияние вышеперечисленных факторов на характеристики многоканальности искрового разряда.

В четвертой главе представлены данные, показывающие возможность параллельного использования неуправляемых двухэлектродных разрядников-обострителей со сверхсжатым газом при обострении фронта импульса, генерируемого низкоомной коаксиальной формирующей линией сопротивлением ≈10 Ом. Исследована возможность их параллельного включения при присоединении разрядников-обострителей непосредственно на выходе с двойной

формирующей линии, либо через высоковольтные импульсные кабели при длительности импульса в десятки наносекунд.

Установлен разброс времени срабатывания разрядников-обострителей серии РО-43 при параллельной работе со скоростью нарастания напряжения более 10^{12} В/с и коммутируемой энергии ≈ 25 Дж.

В заключении приведены основные результаты и выводы, сделанные в ходе выполнения диссертационной работы.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Высоковольтные коммутаторы. Области применения и основные требования к параметрам

Высоковольтные импульсные технологии занимают высокое место в современных науке, технике и в области реальной экономики, на производствах. В настоящее время особое внимание уделяется разработке сильноточных наносекундных генераторов импульсов напряжением сотни и тысячи киловольт с высоким ресурсом работы, ориентированных на практическое использование в ускорителях, применяемых для различных областей высокотехнологичной медицины, сельского хозяйства, решения экологических задач, исследовательских целей, материаловедения и др. [1-13].

Существуют импульсные генераторы с различными способами накопления энергии. Первый способ — это индуктивные накопители энергии, энергия в которых, накапливается магнитным полем индуктивного контура с током используют размыкающие коммутаторы. Вторым способом накопления энергии обладают генераторы с емкостным накоплением энергии. Накопленная в них энергия передается в нагрузку с помощью замыкающих коммутаторов.

Основными параметрами генератора для ускорителя заряженных частиц, определяющим возможность его применения вне лабораторных стен (как промышленное оборудование), являются стабильные параметры напряжения и тока в серии импульсов и ресурс непрерывной работы (без необходимости технического обслуживания).

В настоящее время известно большое количество различных высоковольтных коммутаторов, обладающих различными параметрами, которые включены в схемы генераторов с емкостными накопителями энергии [1, 14-16].

Коммутатор импульсного ускорителя заряженных частиц, основанного на схеме с накопителями энергии является одним из основных его узлов, к которому предъявляются жесткие требования по пропускной способности и времени

срабатывания. Он должен иметь малые собственную индуктивность и активное сопротивление, высокую точность срабатывания в нужный момент времени и удобно компоноваться с нагрузкой [17]. Коммутатор определяет амплитудно-временные параметры импульса напряжения, импульсную и среднюю мощность ускорителя, снижение потерь энергии при формировании пучка заряженных частиц в ускорителе, амплитуду тока, длительность фронта нарастания тока и способность ускорителя работать с определенной частотой следования импульсов достаточно продолжительный период времени.

1.2 Рабочая среда в коммутаторах

В коммутаторах междуэлектродное пространство заполняется диэлектриком (рабочей средой), который выполняет две функции. С одной стороны не дает развиться процессам для перемыкания междуэлектродного промежутка до момента достижения необходимых параметров. С другой стороны, обеспечивает создание высокой электропроводности в нужный момент времени. Коммутаторы для высоковольтных наносекундных ускорителей должны обладать минимально возможной индуктивностью. Существуют высоковольтные коммутаторы с диэлектриками в виде газа, твердого тела или жидкости [14, 15].

Без слоя диэлектрика между проводниками с различными потенциалами невозможны ни передача, ни генерирование электрической энергии. Поэтому основным назначением диэлектрической изоляции является удержание напряжения, приложенного к проводникам и недопуск его снижения по причине протекания достаточно большого электрического тока в изоляции. Если ток возрастает до величины, при которой падение напряжения во внешней цепи сравнимо с напряжением источника, изоляция перестает выполнять своего предназначения и происходит пробой.

Стоит отметить, что в твердотельных коммутаторах может использоваться как диэлектрик, так и полупроводник. Коммутаторы на основе полупроводников известные как силовые транзисторные ключи (СТК) изготавливают

преимущественно из кремния, карбида-кремния (SiC) и Галие-нитридов (GaN). В настоящее время силовые транзисторы IGBT, MOSFET, SiC и GaN обладают высокой степенью синхронизации момента разряда, высокой частотой срабатывания (до 1000кГц), возможностью работы от самых низких до максимальных напряжений без перестройки схемы, малым уровнем наводок на измерительные цепи, простотой эксплуатации, бесшумностью, большим ресурсом и напряжением до 2 кВ [18]. Современное распределение областей применения транзисторов показано на рисунке 1.

В дальнейшем коммутаторы на основе полупроводников рассматриваться не будут по причине недостаточного максимального рабочего напряжения [19-21].

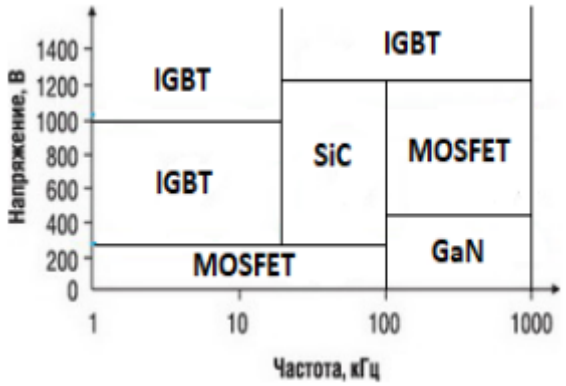


Рисунок 1 – Современное распределение рациональных областей применения транзисторов

В связи с высокой концентрацией молекул (до 10^{23} $см^{-3}$) в межэлектродных промежутках миллиметрового диапазона в твердых и жидких средах напряжение при пробое может достигать значений нескольких мегавольт, коммутируемая энергия доходит до десятков мегаджоулей, а ток до сотен килоампер [1, 14, 15, 22-28].

Вероятно, что впервые на возможность использования в генераторах мощных наносекундных импульсов твердотельных разрядников было указано в работе [29] после проведения измерений времен коммутации пробоя некоторых твердых диэлектриков. Благодаря высокой электрической прочности которой обладают твердые диэлектрики (полиэтилен, фторопласт, лавсан, капролон и др.)

индуктивность разрядного контура может быть очень малой по причине относительно короткого разрядного промежутка. Это позволяет коммутировать токи в сотни килоампер с очень крутыми фронтами напряжения и тока. При этом время запаздывания разряда в твердых диэлектриках быстро уменьшается с ростом перенапряжения β. При β=1,2-1,5 время запаздывания составляет всего несколько наносекунд [25]. Основным механизмом создания высокой проводимости является ударная ионизация электронами. В основном используют твердотельные коммутаторы на самопробое диэлектрика [30, 31]. Для увеличения количества искровых каналов используется идея о создании в твердом диэлектрике искусственных неоднородностей в виде различных включений (игл или шариков). В [32] представлен генератор электронных пучков с током 10^6 А и энергией 10^6 эВ с управляемым многоискровым твердотельным коммутатором скорость роста тока в котором достигает 10^{14} А/с.

Основным недостатком в твердотельных коммутаторах, как и основным преимуществом, ограничивающим их широкое применение является твердотельный диэлектрик. После каждого срабатывания необходимо заменять диэлектрическую вставку в разряднике, так как после прохождения импульса тока она не восстанавливает свои исходные свойства и состояние, в котором диэлектрик способен выдерживать подаваемое на него рабочее напряжение. Таким образом твердотельные коммутаторы являются устройствами одноразового включения.

Для уменьшения паразитной индуктивности и увеличения электрической прочности системы в узлах коммутации мощных импульсных генераторов иногда убирают изолятор разделяющий объем коммутатора от объема накопителя энергии, в этом случае разряд происходит в жидком диэлектрике. Сначала использовалось трансформаторное масло, позже было показано, что очищенная (дистиллированная) вода имеет хорошие коммутационные характеристики [33]. Ионная компонента, участвующая в создании проводимости в жидкостях, помогает обеспечить времена коммутации порядка $10^{-8} \div 10^{-5}$ секунды [1]. Автоионизация и ударная ионизация (разряд с анода или катода) являются наиболее вероятными процессами для образования свободных носителей зарядов [34]. В то же время

существующие представления о явлениях, протекающих на стадии формирования разряда, не могут однозначно ответить на вопрос о природе образования носителей заряда, это затрудняет выбор наиболее эффективного способа инициирования. По этой причине разработка жидкостных разрядников ведется по рекомендациям, которые присущи газовым разрядникам [15, 35, 36].

В мощных импульсных генераторах наличие микропузырьков газа загрязнений примесями, продуктов разряда и температурных неоднородностей снижает электрическую прочность жидких диэлектриков незначительно при временах воздействия напряжения $t_в \approx 10^{-6}$ с. Поэтому смена диэлектрика в разрядном промежутке может потребоваться лишь через несколько сотен срабатываний, но при повышении мощности разрядов в очищенной воде или трансформаторном масле потребуется принудительная замена диэлектрической жидкости в междуэлектродном зазоре после каждого срабатывания [37]. Тем не менее постепенно происходит деградация жидкости за счет изменения ее химического состава и образование соединений на поверхности электродов, что ухудшает стабильность срабатывания коммутатора и снижает напряжение пробоя. Так же по причине малого коэффициента диффузии жидкости восстановление исходной электрической прочности в междуэлектродном зазоре может занять время от нескольких миллисекунд до нескольких секунд, что ограничивает максимальную частоту срабатывания коммутаторов с жидким диэлектриком без принудительной прокачки рабочей среды в лучшем случае единицами герц. При организации прокачки жидкого диэлектрика разрядник получается довольно громоздким.

Разрядники с жидким диэлектриком активно проектировались и исследовались в НИИ Высоких напряжений при Томском политехническом институте, например [38]. Снижение влияния искрового пробоя на состояние диэлектрической жидкости и поверхности электродов достигалось увеличением числа каналов участвующих в коммутации. Для повышения неоднородности поля в разрядном промежутке используется два способа: конфигурация электродов или перераспределение электрического поля на границе раздела двух сред с резко

различающимися диэлектрическими проницаемостями. Срок службы разрядников в таком случае удается поднять до 5 х 10^3 включений при коммутации 5 ÷ 8 кДж [39].

Газовая рабочая среда в отличие от твердотельной и жидкой восстанавливает свои электрические свойства после завершения процесса коммутации гораздо быстрее. Диффузионные процессы в газовой среде происходят за время порядка нескольких миллисекунд, позволяя коммутаторам, работающим в среде сжатых газов работать на частотах повторения импульсов в несколько десятков герц, а при осуществлении принудительной замены газовой среды в междуэлектродном промежутке достигать частоты в десятки килогерц [1, 14, 15, 40-43].

Коммутаторы на основе газовых сред уступают твердотельным и жидкостным коммутаторам по значениям максимальных напряжений и токов при сопоставимых размерах. Достигнутые к настоящему времени значения коммутируемой энергии с использованием искровых разрядников достигают сотен килоджоулей при напряжениях и токах, соответственно, $U_{max} \leq 10$ МВ и $I_{max} \leq 1000$ кА. В газовой рабочей среде время создания высокой электропроводности сильно зависит от рабочего давления, которое может достигать нескольких сотен атмосфер и сорта газа либо газовой смеси. Возможно получить время коммутации в пределах десятков наносекунд и даже долей наносекунд [1, 3, 14, 15, 40, 41, 44, 45]. В то же время от полупроводниковых приборов искровые разрядники выгодно отличаются высокой температуроустойчивостью, высоковольтностью и устойчивостью к перегрузкам по току.

Очевидно, что в результате рассмотрения основных типов рабочих коммутирующих сред можно выявить явные преимущества газообразных сред перед твердотельными и жидкостными при создании высоковольтных управляемых разрядников, способных работать на частотах повторения импульсов до 100 Гц, пропускать энергию до нескольких килоджоулей с минимальным временем запаздывания, хорошей управляемостью и временем коммутации.

1.3 Модели формирования газового разряда, процессы происходящие в разряднике

В газовых коммутаторах наиболее широко применяется искровой разряд, для которого возможна работа с напряжением до 10^7 В в разрядном промежутке и большой ток с амплитудой до 10^6 А. Для них так же есть возможность получить малое время коммутации $t_k = 10^{-8} \div 10^{-10}$ с. Возникновение искрового разряда происходит при больших давлениях и большой разнице потенциалов между электродами. Потенциал зажигания высок до возникновения искрового разряда и после возникновения пробоя между электродами напряжение на промежутке резко падает. Токи, протекающие в искровом канале, достигают тысяч ампер, а температура более 10^3 К. При переходе из несамостоятельного разряда в самостоятельный искра останется конечной стадией развития разряда при условии недостаточной мощности источника питания и время прохождения тока для возникновения и поддержания стационарного дугового разряда.

Отношение $p{\cdot}d$ (произведение давления p на длину межэлектродного промежутка d) и напряженность электрического поля, согласно литературным данным, могут влиять на развитие искрового канала двумя различными механизмами. Таунсендовский механизм (при малых значениях $d < 1$см, давлениях p ниже атмосферного и однородном поле в промежутке), и стримерный механизм формирования канала (для больших значений $p{\cdot}d$, для воздуха при нормальных условиях $p \cdot d \geq 5 \cdot 10^5$ Па $\cdot$ см и в промежутках с неоднородными полями) [1, 15, 40, 46-51].

Теория Таунсенда описывает прогрессивно развивающийся разряд в газе при условии роста числа лавин. Это становится возможным благодаря появлению от каждой лавины более чем одной новой лавины. Новые лавины образуются в результате появления свободных электронов вблизи катода после облучения его фотонами или положительными ионами от предыдущей лавины. Условие возникновения новой лавины имеет вид

$$\mu = \gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1, \qquad (1)$$

где $e^{\alpha d}$ – число электронов в лавине при попадании на анод; γ – число электронов, освобожденных с катода в результате фотонно-ионного γ-процесса на один электрон лавины (коэффициент поверхностной ионизации); α – количество новых электронов, образуемых электроном в газе на пути в 1 см (коэффициент объемной ионизации); d – длина промежутка. Известно, что $\alpha = pf_1(E/p)$ и $\gamma = f_2(E/p)$, где p – давление газа в мм. рт. ст., f_1, f_2 – эмпирические функции E/p (отношение напряженности электрического поля (В/см) к давлению газа). Значения этих функций в широком диапазоне можно найти в [49, 50]. При $\mu = 1$ $E/p = E_{ст}/p = U_{ст}/pd$, где $U_{ст}$ - статическое пробивное напряжение, из (1) получаем, что $U_{ст} = f_з(pd)$. Зависимость $f_з(pd)$ носит название закона Пашена и приведена на рисунке 2 для различных газов. Для U_0=$U_{ст}$ время формирования разряда $t_ф$ будет стремиться к бесконечности. Окончательная величина $t_ф$ будет получатся из-за $\mu > 1$ в результате искажения электрического поля объемным зарядом положительных ионов.

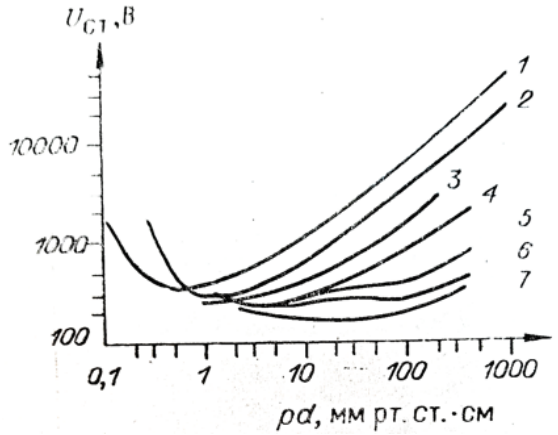


Рисунок 2 – Зависимость статического пробивного напряжения от произведения pd для различных газов в однородном поле.
1 – воздух; 2 – H_2; 3 – Ar; 4 – Ne; 5 – Ne+0.0005%Ar; 6 – Ne+0.002%Ar; 7 – Ne+0.1%Ar.

При $U_0 > U_{ст}$, где U_0 – импульсное пробивное напряжение, из (1) имеем $\mu > 1$. Если не брать в расчет искажение поля объемным зарядом $t_ф$ определяется развитием множества лавин. Известно, что $t_ф$ зависит от μ, которая в свою очередь, согласно (1) зависит от U_0, так как следуя в [52],

$$\alpha \approx p\, exp\left(-B_p/E\right), \tag{2}$$

где B – постоянная для конкретного газа.

Решение для времени формирования $t_ф$:

$$t_ф = \frac{\mu t}{\mu - 1} \ln \frac{1 + (\mu - 1) i\left(t_ф\right)/i_0}{\mu}, \tag{3}$$

где $t=d/v_+$ – время движения ионов от анода к катоду; i_0 – плотность начального тока с катода; $i(t_ф)$ – ток, при котором напряжение на промежутке начинает спад.

Экспериментальная зависимость $t_ф(E_0)$ для воздуха при p = 1 ат и d ≈ 1мм представлена на рисунке 3 [53].

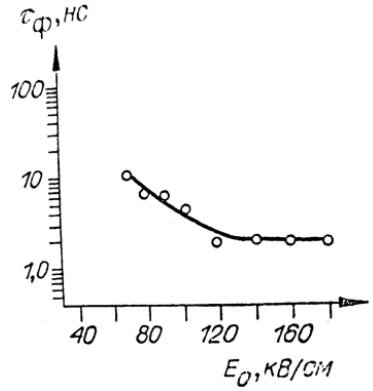


Рисунок 3 – Зависимость времени формирования разряда tф в воздухе от напряженности электрического поля.

При $\mu \gg 1$ получается сильное расхождение экспериментальных данных и теории Таунсенда. К тому же следует иметь ввиду, что одна лавина не в состоянии вызвать пробой потому, что число электронов в ней не превышает значения 10^8 [48]. В таком случае наступает явление торможения роста числа электронов полем собственного объемного заряда ионов.

Теория стримеров хорошо объясняет явления, происходящие в искровом разряде, согласно теории при коротковолновом излучении головки основной лавины благодаря фотоионизации газа в междуэлектродном промежутке возникает ионизированный канал. Несколько лавин при этом объединяются в один общий стример. Лавины образуются при выполнении следующих условий: 1) когда поперечное поле возникшей лавины примерно становится равным по величине

продольному, происходит пробой; 2) наряду со слиянием боковых лавин с основной напряженность поля должна увеличиваться вместе с увеличением количества фотонов, которых должно быть достаточно для поддержания и распространения стримера. На рисунке 4 показана схема развития искровых каналов [40]. Поведение плазмы за головкой канала рассмотрено в [54], это является важным при исследовании последующих разрядных процессов (вторичных стримеров, образования стебля и искрового канала).

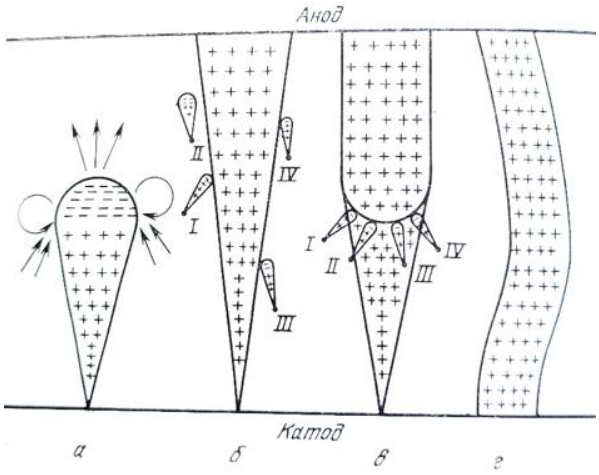


Рисунок 4 – Схема образования положительного стримера:
а – начало развития основной лавины (стрелки показывают силовые линии результирующего электрического поля лавины); б – основная лавина достигает анод (I – IV – боковые лавины, образованные фотонами); в – боковые лавины соединяются с основной, образуется стример; г – образование стримера завершено.

При подаче на электроды разрядника напряжения, достаточного для его пробоя, другими словами, в момент, когда в междуэлектродном промежутке создается такая напряженность электрического поля, которая обеспечит условие перехода разряда из несамостоятельной формы в самостоятельную, разрядник скомутируется. Сопротивление междуэлектродного промежутка стремится к очень малым значениям с величиной равной десятые и сотые доли ома. В момент пробоя через разрядник протекает практически ток короткого замыкания, величина и форма которого будет зависеть от величины и характера нагрузки, а напряжение в нём резко падает. Ток в междуэлектродном промежутке будет проходить через

высокоионизированный канал разряда до тех пор, пока энергия, поступающая от источника питания в канал разряда в единицу времени, не станет меньше мощности потерь разряда. При достижении этого условия разряд прекращает существование. В междуэлектродном промежутке происходит деионизация, восстановление электрической прочности и возвращение разрядника в исходное состояние.

Таунсендовский разряд при давлениях от атмосферного и выше, при d = 1 см происходит только при перенапряжении δ <0,1. При больших перенапряжениях наступает стримерный пробой [55,56]. Кривая, показывающая разделение таунсендовского и стримерного механизмов пробоя воздуха показана на рисунке 5.

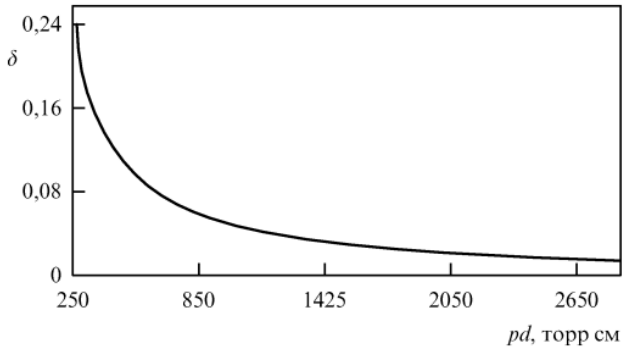


Рисунок 5 – Кривая, разделяющая области развития разряда в воздухе по таунсендовскому механизму (ниже кривой) и стримерному механизму (выше кривой).

1.4 Основные параметры и характеристики искровых разрядников

К основным электрическим параметрам и характеристикам искровых разрядников относятся: статическое и динамическое напряжение пробоя, электропрочность, время запаздывания зажигания разряда, потери мощности, время восстановления электрической прочности, потенциал погасания разряда, диапазон рабочих напряжений ΔU.

1.4.1 Статическое напряжение пробоя. Пробой междуэлектродного промежутка следуя из теории газового разряда [57] подчиняется закону Пашена. Согласно закону Пашена, напряжение пробоя, соответствующее произведению

давления на расстояние между электродами, называется статическим напряжением пробоя.

Для постоянного произведения давления газа на расстояние между электродами ($p \cdot d$) статическое напряжение пробоя зависит от коэффициентов γ и α. Если выполняется условие перехода разряда из несамостоятельного в самостоятельный, наступает пробой [50]. Ток электронов i, приходящих на анод при воздействии однородного поля определяется из соотношения:

$$i = i_0 e^{\alpha d} / [1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)], \quad (4)$$

Коэффициент α оказывает сильное влияние на напряжение пробоя промежутка, так как находится в степени выражения (4). Существует вероятность пробоя междуэлектродного промежутка при напряжении, отличном от статического напряжения пробоя по причине того, что вторичная электронная эмиссия с катода, ионизация в газе и предразрядный ток являются случайными величинами. По этой причине кривые Пашена строятся по усредненным значениям напряжения пробоя.

Известно, что любое загрязнение катода в некоторой степени изменяет напряжение пробоя, следовательно, минимальное среднеквадратичное напряжение пробоя получается только при чистых поверхностях с одинаковой работой выхода. Так из металлов (никель, молибден, алюминий, вольфрам, медь) наибольшим среднеквадратичным напряжением пробоя обладает медь, а наименьшим никель. В газах же среднеквадратичное напряжение пробоя в молекулярных газах (водород, азот) больше, чем в инертных газах. Предварительная ионизация в междуэлектродном промежутке увеличивает стабильность пробоя [40].

1.4.2 Электропрочность. Параметр применимый к управляемым разрядникам. Электропрочность характеризует надежность работы приборов на напряжении, близком к верхней границе диапазона рабочих напряжений. В случае правильного выбора параметра электропрочности для разрядника, полностью исключается его самопроизвольный пробой при достижении верхней границы

диапазона рабочих напряжений без подачи на управляющий электрод импульса напряжения.

1.4.3 Динамическое напряжение пробоя и время запаздывания. Для искровых разрядников при их эксплуатации на первый план выходит не статическое напряжение пробоя, а динамическое. Динамическое напряжение пробоя зависит от конструкции разрядника, схемы применения, условий эксплуатации и определяется формулой

$$U_{\text{дин}} = U_{\text{ст}} + t_{\text{з}}\left(\frac{dU}{dt}\right), \quad (5)$$

где $t_{\text{з}}$ – время запаздывания зажигания разряда; dU/dt – скорость нарастания напряжения на разряднике.

Из формулы (5) видно, что динамическое напряжение пробоя всегда больше статического на величину $t_{\text{з}}(dU/dt)$. Скорость нарастания напряжения на разряднике зависит от параметров схемы, в которой работает разрядник, время запаздывания зажигания в свою очередь зависит от конструкции разрядника и условий эксплуатации.

Время запаздывания зажигания разряда складывается из двух компонентов:

- время запаздывания зажигания $t_{\text{з}}$, т.е. временной интервал между моментом, когда к междуэлектродному промежутку прикладывается напряжение и появлением первого инициирующего электрона способного привести к пробою;
- время формирования заряда $t_{\text{ф}}$, т.е. время от момента появления первого инициирующего электрона до момента пробоя промежутка.

В приборах с накаленным катодом время запаздывания зажигания зависит в основном от времени формирования разряда, в искровых разрядниках наоборот время запаздывания велико относительно времени формирования разряда.

При давлении газа в коммутаторе до 1330 Па (10 мм рт. ст.) характерен таунсендовский механизм и время формирования определяется скоростью движения ионов в междуэлектродном промежутке. Для промежутков в несколько

миллиметров это составляет приблизительно $10^{-4}\div10^{-5}$ с. При давлении $13{,}3\cdot10^2$ Па (100 мм рт. ст.) фотоэмиссия с катода начинает играть значительную роль и время формирования равно скорости движения электронов (10^{-7} с). При еще большем давлении основным механизмом формирования разряда становится стримерный с временем ($10^{-8}\div10^{-9}$ с). Для искровых разрядников характерно высокое давление ($>13{,}3\cdot10^2$ Па), поэтому временем формирования разряда можно пренебречь, по причине того, что оно на несколько порядков меньше времени запаздывания.

Появление заряженной частицы в междуэлектродном промежутке носит случайный характер, зависящий от внешних ионизирующих факторов, поэтому время запаздывания величина случайная, характеризующаяся как своим средним значением, так и определенным законом распределения.

Интегральный закон распределения времени запаздывания можно записать как выражение

$$F(t) = 1 - e^{-t/t_з}. \qquad (6)$$

Время запаздывания $t_з$ в этом уравнении зависит от скорости образования свободных электронов м межэлектродном промежутке под действием какого-либо ионизатора и вероятности того, что каждый образовавшийся электрон приведет к пробою. Из уравнения (6) можно найти максимальное время запаздывания.

Для уменьшения времени запаздывания в искровом разряднике существует несколько методов. К таким методам относятся, например подсветка междуэлектродного промежутка светом от источника ультрафиолетового излучения или от близкорасположенной искры, подсветка лазером, вспомогательный (тлеющий) разряд [58]. Другим методом увеличения изначальной концентрации электронов может быть введение в промежуток радиоактивного изотопа в виде покрытия поверхности электродов или стенок разрядника радиоактивной краской или добавления изотопа в рабочий газ [40, 58, 59].

Количество свободных электронов, которое образуется из пучка электронов и нужно для уменьшения времени запаздывания до необходимой величины определяется выражением $z = K/E$, где К – энергия пучка электронов, Е – средняя энергия, расходуемая на образование ионов. Время запаздывания в случае

подсветки радиоактивным изотопом $t_з = \mathrm{E}/\mathrm{MAE_р} \cdot 3{,}7 \cdot 10^{10}$, где М и А – масса и удельная радиоактивность изотопа; $\mathrm{E_р}$ – Энергия частиц, испускаемых при распаде.

Материал электродов из-за различных коэффициентов поверхностной ионизации γ также влияет на время запаздывания, однако это влияние крайне невелико даже по сравнению с оксидной пленкой на поверхности электродов.

На величину времени запаздывания также влияют такие факторы как сорт газа или газовой смеси, давление, величина перенапряжения, геометрия разрядника.

Время запаздывания связано с расстоянием между электродами и сортом газа через формулу $t_з = conste^{-\alpha d}$. Из уравнения видно, что с увеличением расстояния между электродами d и величины коэффициента объемной ионизации α время запаздывания экспоненциально уменьшается. Если предположить, что частота образования свободных электронов под действием какого-либо ионизирующего фактора в единице объема постоянна, то при увеличении объема газа между электродами, растет и количество свободных электронов, а следовательно, уменьшается время запаздывания. С другой стороны, увеличивая расстояние между электродами увеличивается путь свободных электродов до анода. При одинаковом коэффициенте объемной ионизации α на более длинном пути увеличивается также количество свободных электронов в лавине, что ведет к уменьшению времени запаздывания.

Наименьшее время запаздывания при одинаковом напряжении пробоя и равном расстоянии между электродами наблюдается при разряде в ксеноне и водороде, затем идет аргон. Максимальное время запаздывания имеют неон и гелий. В молекулярных электроотрицательных газах, таких как хлор, кислород, окись углерода время запаздывания зажигания получается больше, чем в инертных, потому что электроотрицательные газы способны образовывать отрицательные ионы захватывая свободные электроны из газа. Чем больше вероятность захвата электронов молекулами газа, тем больше время запаздывания. Хлор и кислород дают наибольшее время запаздывания.

Также время запаздывания зависит от величины коэффициента перенапряжения в междуэлектродном промежутке К. Время запаздывания сокращается с увеличением коэффициента перенапряжения. Зависимость времени запаздывания от величины коэффициента перенапряжения выражается формулой:

$$t_{\text{пз}} = t_{\text{з}}/(\text{К} - 1)^n, \qquad (7)$$

Из кривых на рисунке 6 видно, что при n=3 формула (7) достаточно точна, чтобы использоваться в качестве эмпирической при К=1,1÷3 для инертных газов, а также водорода. При использовании молекулярных газов (воздух, азот, кислород, окись углерода) формула (7) точна для К=1,5÷4 [40].

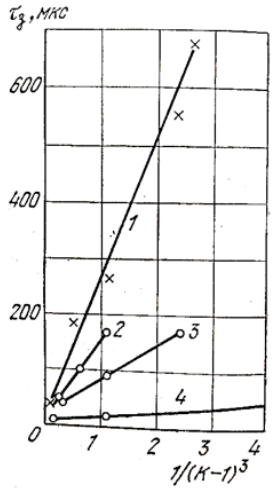


Рисунок 6 – Зависимость времени запаздывания от величины коэффициента перенапряжения в инертных газах и водороде: 1 – гелий; 2 – аргон; 3 – водород; 4 - ксенон.

1.4.4 Потери мощности в искровых разрядниках. После подачи напряжения на схему, состоящую из источника питания, накопительного конденсатора, разрядника и нагрузки происходит пробой в момент достижения на конденсаторе напряжения пробоя разрядника. При $R_H > 2\sqrt{L/C}$ ток нарастает за очень короткое время, которое зависит от индуктивности нагрузки, затем ток экспоненциально спадает до нуля со скоростью $\frac{di}{dt} = \frac{U_0}{R_H^2 C} exp\left(-\frac{t}{R_H C}\right)$.

Энергия, выделившаяся в разрядной цепи за один импульс равна $W = CU_{\text{пр}}^2/2$, а средняя мощность равна энергии, умноженной на частоту следования импульсов: $P_{\text{ср}} = CU_{\text{пр}}^2 f/2$.

Коэффициент полезного действия схемы зависит от запасенной энергии, выделяющейся на разряднике и в нагрузке: $\eta = (W - \Delta W)/W$, где $\Delta W = \int_0^1 i(t)\,u(t)dt; i(t)$ и $u(t)$ – мгновенные значения тока и напряжения за время длительности импульса t_1. Зная аналитические выражения для мгновенных значений тока и напряжения за время длительности импульса, можно вычислить мощность, выделяемую в разряднике:

$$P = \Delta W f = \frac{1}{T}\int_0^{t1} i(t)\,u(t)\,dt. \qquad (8)$$

Средняя мощность, выделяемая в разряднике, ведет к нагреву электродов и корпуса разрядника, а также влияет на скорость распыления электродов, поэтому при проектировании разрядников этому нужно уделять особое внимание.

Потери мощности в разряднике в основном происходят в катодной области (зависят от материала и сорта газа) и в положительном столбе искрового канала (зависит от расстояния между электродами, сорта и давления газа), потерями в области анода невелики и ими можно пренебречь. Из теории положительного столба дугового разряда следует, что при увеличении длины искрового канала потери в разряднике возрастают линейно. При увеличении работы выхода материала катода возрастает падение напряжения на катоде и, следовательно, возрастают потери энергии. Потери энергии в разряднике также возрастают при увеличении потенциала ионизации газа.

1.4.5 Время восстановления электрической прочности. Характеристика, относящаяся к частотной работе разрядника. Процесс восстановления прочности междуэлектродного промежутка выглядит следующим образом: после окончания разряда концентрация заряженных частиц положительного столба ионизированного газа велика. В следствие приложенного к электродам напряжения возле катода образуется ионный слой. На короткий момент времени электрическая прочность определяется прочностью этого слоя. По мере падения концентрации

заряженных частиц толщина ионного слоя увеличивается. На рисунке 7 приведены экспериментальные кривые восстановления электрической прочности в межэлектродном промежутке для некоторых газов (водород, кислород, аргон, азот). Кривые имеют два участка с различным углом наклона. Изначально скорость восстановления электрической прочности зависит от концентрации зарядов в столбе, затем, при малой концентрации зарядов ионный слой распространяется на весь катод-анодный промежуток (кривая восстановления принимает более пологий вид). Электрическая прочность полностью восстанавливается. Скорость восстановления второго участка соответствует скорости остывания газа, этот процесс идет медленнее спада концентрации зарядов.

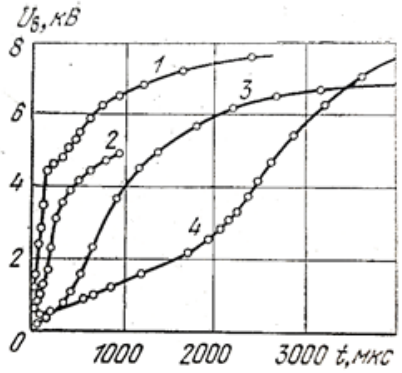


Рисунок 7 – Кривые восстановления электрической прочности междуэлектродных промежутков в разных газах: 1 – водород; 2 – кислород; 3 – аргон; 4 - азот.

Пренебрегая отводом тепла через электроды остывание межэлектродного промежутка со столбом газа радиусом r, длиной d и температурой T охлаждаемого конвекцией выглядит следующим образом:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{(T - T_0)2\pi d\varepsilon_к \lambda}{\ln(D/2r)\, mC}, \tag{9}$$

Где λ и С – теплопроводность и теплоемкость газа; m – масса газа в столбе; T_0 и Т – температура стенки и газа; D – диаметр разрядника.

$\varepsilon_к$ – коэффициент конвекции, определяющийся по формуле $\varepsilon_к = 0{,}18(g_r p_r)^{0.25}$, где g_r – критерий Грасфора; p_r – критерий Прандтля.

Если в (7) подставить m из уравнения Клайперона и ввести молярную теплоемкость C_p, то получим

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T(T - T_0)2\pi\lambda dR\varepsilon_к}{C_p C V \ln(D/2r)}.$$

В уравнении $V = \pi r^2 d$ – объем газа в столбе. Интегрируя уравнение, получаем время охлаждения газа t:

$$t = \frac{\ln\frac{T_1}{T_1 - T_0} r^2 \ln\left(\frac{D}{2r}\right) C_p C}{2\lambda T_0 R\varepsilon_к}. \quad (10)$$

В (10) все постоянные зависят от сорта газа. Частота работы искровых разрядников обычно не превышает 200 Гц. Частота работы возрастает с увеличением теплопроводности газа и уменьшением амплитуды коммутируемого тока.

1.4.6 Диапазон рабочих напряжений. Характеристика относящаяся к трехэлектродным или многозазорным разрядникам с управляющим электродом. Под диапазоном рабочих напряжений разрядника понимают диапазон междуэлектродного напряжения, который пробивается только при подаче управляющего импульса. Верхняя граница диапазона означает, что при этом напряжении в разряднике отсутствует явление самопробоя и пробой наступает исключительно при подаче напряжения управляющего импульса. Если напряжение в междуэлектродном промежутке превышает верхний диапазон, происходит явление самопробоя без подачи импульса управляющего напряжения. Нижняя граница диапазона рабочих напряжений определяет минимальное напряжение, при котором разрядник пробивается без пропусков при подаче импульса управляющего напряжения. При дальнейшем понижении напряжения сначала начинаются пропуски срабатывания, а после разрядник перестает пробиваться вовсе.

1.4.7 Долговечность, распыление материала электродов. Распыление материала электродов и связанное с ним поглощение рабочего газа являются основными факторами, ограничивающими долговечность работы разрядника.

Бомбардировка ионами катода является основной причиной распыления материала электродов [50, 60]. Чтобы рассчитать скорость распыления материала катода необходимо представлять механизм передачи энергии ионами кристаллической решетке металла и уметь вычислять эту энергию с учетом всех параметров междуэлектродного промежутка. В литературе описаны две теории механизма выбивания материала катода.

Первая представлена в 1923 году П. Л. Капицей (теория локального нагрева) гласит, что энергия падающего иона передается группе атомов из кристаллической решети, происходит быстрый разогрев этого участка с образованием «лужицы» металла часть из которого выплескивается, а другая часть испаряется.

Вторая теория основывается на распылении электродов в искровом разряде при очень большой энергии в результате воздействия на поверхность электродов высокой температуры и динамических струй газа.

Однако не одна теория не дает точно рассчитать скорость распыления материала по причине сложности оценки энергии, приносимой ионами на катод [40]. В последнее время, с развитием вычислительной техники и специализированных программ вычисления становятся намного точнее [61], тем не менее основным методом оценки эрозии остается измерение образцов. Так для полусферических медных электродов с междуэлектродным расстоянием в 9 мм работающем в атмосфере азота на напряжении до 90 кВ при 11 кА коммутируемого тока потеря массы за одно срабатывание разрядника составляет всего 3 мкг, в то время как при 45 кА превышает 20 мкг. Это означает, что потеря массы увеличивается экспоненциально с увеличением амплитуды тока [62].

Эрозия различных материалов и морфология поверхности в результате воздействия разряда позволили сделать вывод о том, что наиболее стойкими к эрозии материалами являются сплавы ВНЖ-7-3 (Вольфрам (91 - 92%), никель (4 - 5%) и железо (1,8 - 2,7%) и эльконайт (сплав меди с вольфрамом) [60, 63].

В работе [64] приведены исследования механизмов эрозии электродов разрядника работающего в среде сжатого воздуха. Проведены измерения скорости эрозии материалов электродов, таких как латунь, нержавеющая сталь, алюминий и

эльконайт и оптическое изучение поверхностей электродов. Для частоты в 10 Гц максимальная эрозия катода в виде объема эродированного материала на кулон заряда наблюдалась для латуни $36{,}6 \times 10^{-6}$ $см^3$ $Кл^{-1}$, для нержавеющей стали, алюминия и эльконайта соответственно: 7,31; 7,72 и 8,58. Для анода эльконайт показал наименьшую скорость эрозии $5{,}44 \times 10^{-6}$ $см^3$ $Кл^{-1}$, наибольшую алюминий $11{,}37 \times 10^{-6}$ $см^3$ $Кл^{-1}$. Для частоты 1 кГц результат получился неожиданным. Наибольшую скорость эрозии показал эльконайт как для анода $16{,}58 \times 10^{-6}$ $см^3$ $Кл^{-1}$ так и для катода $19{,}55 \times 10^{-6}$ $см^3$ $Кл^{-1}$. Для анода наилучшую стойкость показала латунь, а для катода нержавеющая сталь $6{,}3 \times 10^{-6}$ $см^3$ $Кл^{-1}$.

В [65] приведены ресурсные испытания разрядника с искажением поля. Разрядник пропускает токи до 10^6 А, при этом через каждый канал многоканального разрядника проходит ток до 100 кА. В качестве материала электродов в разряднике используется металлокерамика ВНМ (вольфрам – никель – медь). После 1000 коммутаций напряжение пробоя уменьшается на 6%, падение напряжения на 10% происходит приблизительно через 1500 импульсов. После 1000 импульсов промежуток между электродами по причине эрозии увеличился на 0,05 см (7%).

В статье [66] также исследовался унос массы электродов в процессе эрозии. Искровой разрядник способен коммутировать ток до 100 кА при напряжении до 100 кВ. Исследовались электроды из нержавеющей стали, медно-вольфрамового сплава и графита. Получились следующие результаты по потере массы: для нержавеющей стали 380, 1 мкг/Кл, медно-вольфрамового сплава 118,1 мкг/Кл и для графита 81,9 мкг/Кл. Про частоту работы разрядника и сорт газа в работе не сказано.

В работах [63, 67] внимание уделялось изменению поверхности электродов после длительной работы разрядников. Измерялись параметры шероховатости, наличие микровыступов, анализ химического состава поверхности электродов и микроскопия.

Также стоит отметить работу [68] в которой комплексно исследовалась эрозия электрода из сплава вольфрам-медь при коммутации в воздухе и воде.

Эрозия электродов исследовалась вплоть до 100 импульсов и показала значительно больший износ электродов при коммутации в воде.

В работе [69] исследовался механизм эрозии и деградации материала электрода (в том числе сплава меди с вольфрамом) и изолятора из различной керамики (оксид алюминия, циркония, нитрид-алюминиевая и др.). Оценивалось время жизни различной керамики (запыление, деградация от ультрафиолетовой подсветки)

Анализ литературы позволяет выделить два основных направления по которым ведутся работы по увеличению долговечности разрядников:

1. Изобретения, направленные на решение задач по уменьшению распыления материала электрода.

2. Изобретения, направленные на создания таких конструкций, в которых бы устранялось и уменьшалось влияние продуктов распыления электродов на параметры прибора.

1.5 Коммутаторы со сжатым газом

1.5.1 Влияние газовой смеси. Газовая рабочая среда в коммутаторах генераторов ускорителей заряженных частиц выбирается из соображений уменьшения паразитной индуктивности, чтобы получить максимальную крутизну коммутируемого тока di/dt, возможности работы в частотном режиме, а также характера коммутации (в том числе многоканальность). Многоканальная коммутация разрядника повышает скорость нарастания мощности в нагрузке, увеличивает к.п.д. и долговечность установки, так как при многоканальной работе коммутатора уменьшается активная и индуктивная составляющие его импеданса, а также снижается эрозия электродов. В модели Вайцеля – Ромпе [15, 70], которая описывает начальную стадию искрового разряда, постоянная искрового разряда a, определяющая сопротивление искрового канала $\left(R{\sim}a^{-1/2}\right)$, равна для воздуха и азота $a = 1$, а для аргона $a = 20$ [14]. Использование чистого элегаза (SF_6) имеющего прочность в 3 раза выше прочности воздуха (азота) [71], позволяет

существенно уменьшить габариты коммутатора. Отрицательной стороной элегаза остается его стоимость и уменьшение электрической прочности после нескольких импульсов при коммутации больших энергий, поэтому выгоднее использовать смесь элегаза с азотом. Электрическая смесь 90% азота и 10% элегаза вдвое выше прочности чистого азота [72], причем такая смесь значительно устойчивее к воздействию электрических разрядов по сравнению с чистым элегазом. Время запаздывания в такой смеси в два раза меньше, чем в чистом азоте. При увеличении содержания элегаза время запаздывания $t_з$ увеличивается. Для чистого азота и для смеси 50%N_2 + 50%SF_6 $t_з$ примерно одинаково [15]. Практически аналогичный состав газовой смеси использовался в разряднике [73], 5%SF_6+95%воздуха. В том же источнике использовали смесь 5%SF6+95%He. Эта смесь в 16 раз меньше плотности элегаза и в 3 раза меньше плотности воздуха, что дает уменьшение плотности тока за счет более интенсивного расширения искрового канала, а значит и меньшую эрозию электродов. Анализ осциллограмм спада напряжения на разрядном промежутке показывает, что добавка к газовой смеси больших количеств аргона существенно затягивает спад напряжения на промежутке. Добавка Ar, с одной стороны ухудшает коммутационную характеристику искрового канала, с другой уменьшает время запаздывания срабатывания разрядника. Следовательно, при параллельной работе большого числа искровых каналов небольшие добавки Ar полезны для улучшения условий работы коммутатора [74]. В этой же работе исследовано влияние различных сочетаний чистых газов и газовых смесей (N_2, Ar, SF_6) на крутизну спада напряжения управляемого разрядника при 10 атм. Максимальная крутизна спада напряжения получена в случае смеси 80%N_2+10%SF_6+10%Ar при 8 канальной коммутации. В работе [75] был исследован разряд в газе высокого давления при его инициировании пучком быстрых электронов. В качестве рабочего газа выбран азот с давлением до 16 атм. Коммутируемые токи достигали нескольких десятков килоампер при напряжениях выше 10^5 В. Разрядник типа Р-29 наполнен трехкомпонентной смесью газов 10%O_2+40%CO_2+50N_2 при давлении 1,5-2 атм. Добавка 10% кислорода служит для создания окисной пленки на поверхности

электродов выполненных, из листового вольфрама, что предотвращает их интенсивное распыление. Увеличение содержания кислорода не желательно по причине интенсивного разрушения материала электродов. Добавка CO_2 служит для стабильности напряжения пробоя при отрицательных температурах. Чем больше CO_2, тем больше динамическое напряжение пробоя. Азот в газовой смеси служит для образования при разряде двуокиси азота, которая, связываясь с кислородом и распыленным вольфрамом образует WO_3, что предотвращает закорачивание межэлектродного зазора. Эти химические реакции проходят интенсивнее при давлении выше атмосферного. Разрядник, однако обладает неудовлетворительными характеристиками по разбросу напряжения пробоя в 34% и малым напряжением пробоя до 2,9 кВ [40]. В этом же источнике имеется информация про разрядники, наполненные смесью 40%Ar+60%Ne под давлением 2 атм. (частота до 1 кГц) и водородом при давлении до 3 атм. (частота до 3 кГц). Они также имеют низкое пробивное напряжение.

На рисунке 8 приведена экспериментальная зависимость электрической прочности ($E_{сп}/p$) промежутка от процентного содержания элегаза в смеси с азотом для одного и того же зарядного напряжения ($U_{сп}$=1,45 МВ) и изменения давления газа от 11 атм. (N_2) до 4 атм. (50%N_2+50%SF_6). Видно, что добавка порядка 10% элегаза дает увеличение в два раза по сравнению с чистым азотом. Дальнейшее повышение концентрации элеагза в смеси нецелесообразно, так как не дает существенного прироста электрической прочности, которая достигает 2, 8 при 50% элегаза. Следует также принять во внимание тот факт, что при неоднократной коммутации разрядника большая концентрация элегаза влияет на электрическую прочность отрицательно. Так для смеси газов, содержащей 50% элегаза электрическая прочность снижается на 10% после 30 срабатываний с током ≈30 кА и длительностью 60 нс [15].

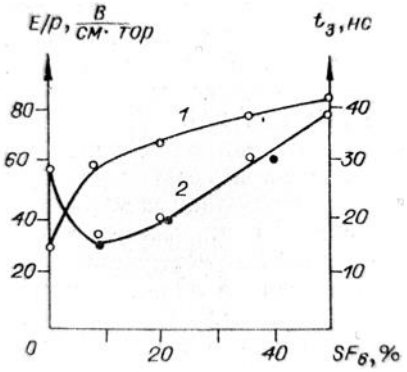


Рисунок 8 – Зависимость электрической прочности промежутка от процентного содержания SF_6 в смеси с N_2 (кривая 1) и зависимость времени запаздывания $t_з$ от процентного содержания SF_6 в смеси с N2 (кривая 2).

Схожий состав газовой смеси использовался в [76], где исследовалась зависимость рабочего напряжения от давления газа в разряднике (Рис 9). Вместо азота в смесь к 10 % элегаза подмешивалось 90% воздуха при давлении да 1,5 МПа. По сравнению с воздухом смесь позволяет достичь гораздо большего рабочего напряжения - до 1,35 МВ. Время запаздывания $t_з$=10мкс, разброс ≤0,1мкс. Также недостатком являются габариты разрядника диаметром 1м и высотой 2,7 м.

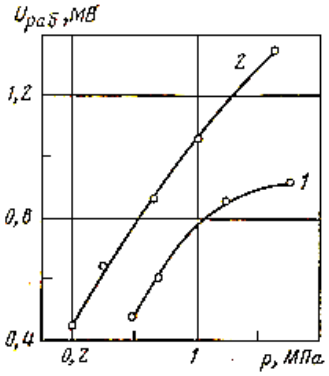


Рисунок 9 – Зависимости рабочего напряжения от давления газа при наполнении разрядной камеры: 1 — воздухом, 2 — 10% элегаза + 90% воздуха

Аргон используется для получения минимального времени коммутации при незначительном избыточном давлении, однако предельная частота срабатывания на аргоне будет низкой. Объяснить это можно следующим образом. Большинство атомов аргона находятся в метастабильном состоянии, а период нахождения электрона на возбужденной орбите составляет 10^{-2} с (у большинства газов 10^{-7}÷10^{-}

^{8} с). По этой причине в моменты спада или нарастания напряжения в междуэлектродном промежутке в аргоне будет намного больше возбужденных атомов, чем в иных газах, а следовательно процесс плазмообразования будет идти быстрее, а процесс восстановления медленнее [76]. При необходимости работы в частотном режиме используют водород либо смеси, содержащие водород. Водород обладает одним из лучших показателей по времени восстановления электрической прочности среди газов (см. пункт 1.4.5). Водород обладает наилучшим потенциалом погасания среди инертных газов, уступая лишь молекулярным газам [40]. Водород в чистом виде наряду со смесью элегаза с азотом широко используется при производстве разрядников-обострителей [45, 77].

В работающем разряднике также происходит интенсивное уменьшение давления газа (жестчение) в следствие поглощения газа связанного с так называемым катодным распылением. Это означает, что частички распыленного материала адсорбируют атомы газа. Химически активные газы (водород, кислород) поглощаются сильнее всего. Жестчение газа является одной из основных причин снижения долговечности прибора. Снижение давления газа приводит к уменьшению напряжения пробоя, а распыленные частицы материала осаждаясь на стенках и изоляции приводят к возрастанию тока утечки. В таблице 1 приведены данные по поглощению инертных газов и водорода [40].

Таблица 1 – Изменение скорости поглощения газа.

Род газа	H_2	He	Ne	Ar	Kr	Xe
Скорость поглощения газов, л·мг/имп	$6{,}8\cdot10^{-3}$	$11{,}8\cdot10^{-5}$	$7{,}75\cdot10^{-5}$	$1{,}58\cdot10^{-5}$	$0{,}84\cdot10^{-5}$	$0{,}8\cdot10^{-5}$

Зависимость времени запаздывания от величины коэффициента перенапряжения в инертных газах и водороде рассматривалась в пункте 1.4.3, время восстановления электрической прочности, также зависящее от сорта наполняемого газа рассмотрено в пункте 1.4.5.

Своевременная замена газовой среды (продувка газа) в междуэлектродном промежутке несколько нивелирует влияние некоторых нежелательных свойств

газов при работе в частотном режиме [58]. Скорость прокачки должна быть достаточной, чтобы убрать плазму из междуэлектродного промежутка, но не слишком высокой для того, чтобы не сильно охладить на катоде зону разряда и сохранить наличие инициирующих электронов для прохождения следующего импульса [1].

Разрядники с принудительной заменой газовой среды описаны в нескольких работах. Так, например в работе [78] для коммутации средней мощности 10 кВт при 12 Дж/имп. и 900 Гц применялась продувка воздуха со скоростью 100 $м^3$/ч.

В работе [79] Крастелев использовал для генератора с амплитудой импульсов напряжения – до 300 кВ, выходным импедансом ≈10 Ом, амплитудой тока разряда – до 25 кА при длительности полупериода 80-90 нс разрядник с продувкой газа работающий на частоте 16 Гц с продувкой осушенного воздуха или азота при давлении 3 атм. Запускающий электрод выполнен из диска толщиной 6 мм для отвода тепла, основные электроды из сплава 70%W+30%Cu.

В [80] также использовалась прокачка газовой смеси в разряднике. Сравнивалась время восстановления прочности разрядника при наполнении его элегазом, воздухом либо смесью элегаза с гелием (80%SF_6+20%He; 50% SF_6+50%He) при давлениях от 0.5 до 1.5 атм.

Быков и др. также использовали продувку газа для двухэлектродного высоковольтного коммутатора сильноточного наносекундного ускорителя электронов «СИНУС» [81]. В качестве рабочего газа использовался азот при давлении до 16 атм. Газ был направлен нормально к траектории пробоя. Коммутировалась 50-омная формирующая линия с электрической длиной 10 нс на согласованную нагрузку. Время зарядки ≈25 мкс, напряжение до 680 кВ, частота до 270 Гц. Среднеквадратичное отклонение коммутируемого напряжения 1%.

1.5.2 Многоканальность пробоя. Как указывалось выше многоканальная коммутация разрядника повышает скорость нарастания мощности в нагрузке, увеличивает к.п.д. и долговечность установки, так как при многоканальной работе коммутатора уменьшается активная и индуктивная составляющие его импеданса, а также снижается эрозия электродов. Для одновременной работы нескольких

каналов необходимо обеспечить минимальный разброс по времени их зажигания. Мартиным экспериментально показано, что разброс по времени может достигать 1%. Мартин приводит два случая в расчете количества каналов. В первом каналами считаются те, что проводят величину тока не менее 45% от величины тока в первом образовавшемся канале. Во втором случае учитываются каналы, проводящие не менее 35% от первого образовавшегося канала. Практически всегда имеется запас по времени срабатывания каналов, в течение которого фронт спадающего напряжения распространяется от одного канала к последующему. Это среднее время t_p прибавляется ко времени, которое требуется чтобы замкнуть все каналы, для получения в них токов, изменяемых от 1 до 0,45 или от 1 до 0,35 от максимального. Было получено

$$\Delta T = f t_\Sigma + 0.8 t_p, \tag{11}$$

где f=0,1 для первого случая и f=0,15 для второго; ΔT – допустимое время, за которое срабатывает N каналов; коэффициент 0,8 в (11) выбран с учетом запаса по времени, связанного с неоднородностью распределения каналов по электродам и другими эффектами. Суммарное характерное время спада напряжения для N параллельных каналов:

$$t_\Sigma = \frac{L}{NR} + \frac{88 d^{1/3}}{R^{1/3} E_0^{4/3}} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{1/2} \frac{1}{N^{1/3}} \tag{12}$$

и

$$t_p = \frac{l}{cN}, \tag{13}$$

где L – индуктивность канала разряда в нГ; R – импеданс генератора, Ом; E_0 – напряженность электрического поля вдоль канала вблизи его в единицах (10 кВ/см); ρ/ρ_0 – отношение плотности газа к плотности при нормальной температуре и давлении; l – общая длина электродов; c – скорость света в диэлектрике, в котором осуществляется коммутация.

Если задан разброс срабатывания каналов по напряжению от среднего напряжения срабатывания σ(U), тогда при напряжении U и средней скорости роста напряжения на поджигающем электроде dU/dt имеем:

$$\Delta T \approx 2\sigma(U) \cdot U \Big/ \frac{dU}{dt}. \qquad (14)$$

Приравнивая (14) и (11), получаем методику расчета числа параллельных N каналов. Из (11) – (14) следует, что, если необходимо получить больше параллельных каналов N нужно уменьшить σ(U) путем использования разрядников с резко неоднородным полем, либо увеличением крутизны нарастания напряжения на поджигающем электроде. Также для увеличения числа каналов можно уменьшить R или увеличить L [15, 82].

Евдошенко, в работе [82] экспериментально проверил реализацию многоканального режима работы в трехэлектродном разряднике с искажением поля, в рельсовом тригатронном разряднике с лезвийным управляющим электродом и в тригатроне относительно расчетов.

В [59] описан разрядник (рис.10), для реализации многоканальной работы которого цилиндрический анод 1 расположен внутри катода 2 с большим количеством ребер. Управляющие стержни 3 находятся между ребрами катода и каждый из них имеет свою цепь возбуждения, которые синхронизованы по времени между собой. Разряд зажигается сразу во многих местах и предотвращает быстрый износ поверхностей, которые к тому же покрыты порошком вольфрама.

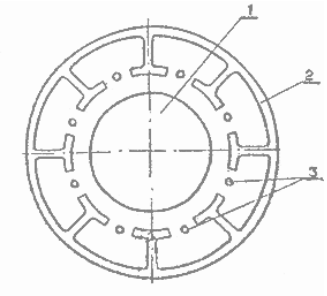


Рисунок 10 – Вид сверху в разрезе управляемого разрядника: 1 – анод; 2 – катод; 3 – управляющие электроды.

В патенте [83] разрядник состоит из нескольких основных разрядных промежутков, работающих одновременно и запускающего разрядника, параллельно которому устанавливается взрывающаяся проволочка, которая служит для уменьшения разброса времени срабатывания основных разрядников.

Недостатком схемы является необходимость монтировать новую проволочку после каждого срабатывания, тем самым невозможность работы в частотном режиме.

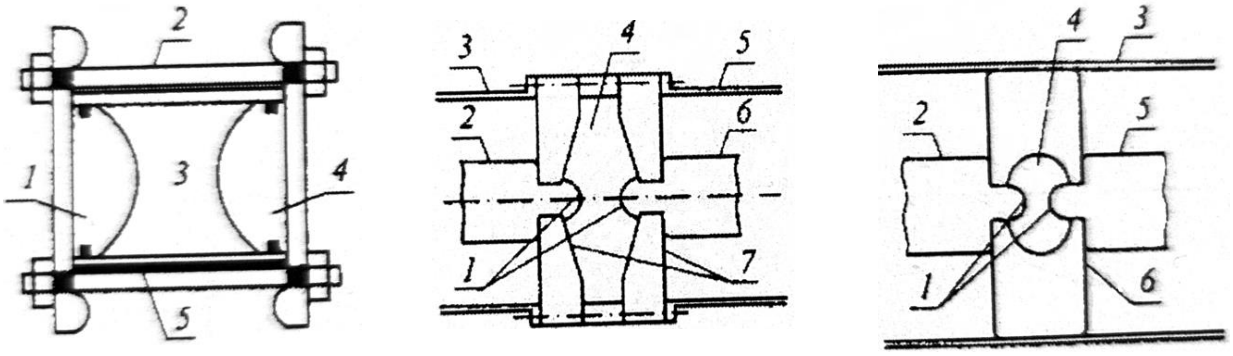
В статье [39] исследовались различные формы электродов для работы в многоканальном режиме. Описан износ электродов с последующим ухудшением коммутационных характеристик. Установлено, что увеличение числа эффективных каналов больше четырех (вплоть до 8÷10) не позволяет заметно уменьшить длительность фронта импульса. Это связано с увеличением активного сопротивления одиночных разрядных каналов при уменьшении амплитуды протекающего через них тока.

Существуют обзорные статьи по многоканальным разрядникам и их применению в импульсной технике [84, 85]. Описаны расчеты многоканальных коммутаторов и параметры, влияющие на их работу.

1.5.3 Двухэлектродные разрядники. Простейший тип коммутаторов использующихся в генераторах мощных наносекундных импульсов, управляемых приложенным напряжением. Так же этот тип разрядников называют – разрядники на самопробое. Коммутация в них происходит в момент, когда напряженность электрического поля E становится больше статической пробивной напряженности E_c. При использовании двухэлектродных разрядников необходимо иметь быструю зарядку линии, чтобы уменьшить габариты разрядника, а следовательно его индуктивность. Но при быстрой зарядке возникает нестабильность пробоя, что создает необходимость настраивать разрядник таким образом, чтобы пробой наступал до достижения максимума зарядного напряжения. Это приводит к уменьшению амплитуды напряжения импульса в нагрузке. С точки зрения зарядного импульса, оптимальным является время около одной микросекунды. Закон Пашена является определяющим при работе разрядника, по этой причине настраивать момент срабатывания можно путем изменения междуэлектродного расстояния, давлением газа или сортом газа или газовой смеси внутри разрядника. Канал разряда, через который протекает ток ограничивает частотные свойства коммутатора по причине большой индуктивности, мешающей получить малые фронты импульсов. В тоже время имея высокую плотность тока канал оставляет

обширную площадь перегретого и расплавленного материала на поверхности электродов, а также область сильно нагретого газа и медленно деионизирующую плазму [1, 15].

Схематические изображения конструкций двухэлектродных разрядников представлены на рисунке 11.



а б в

Рисунок 11 – Схематические исполнения двухэлектродных разрядников: (а) 1,4 – электроды, 2 – шпильки, 3 – газ, 5 – корпус; (б) 1 – электроды, 2, 6 – внутренние проводники, 3, 5 – внешние проводники, 4 – газ, 7 – изоляторы; (в) 1 – электроды, 2, 5 – внутренние проводники, 3 – внешний проводник, 4 – газ, 6 – монолитный изолятор.

Ландль и др. исследовали стабильность срабатывания двухэлектродных разрядников, работающих при повышенном давлении в режиме самопробоя при напряжениях в несколько сотен киловольт [86]. Показано, что нестабильность срабатывания разрядников зависит от времени появления инициирующих электронов и наличием газодинамических возмущений в междуэлектродном промежутке при работе разрядника в частотном режиме. Обе причины приводят к снижению напряжения импульсного пробоя в сравнении со статическим пробивным напряжением. При достижении среднего электрического поля в междуэлектродном промежутке 400 кВ/см и выше, инициирование разряда током автоэмиссии приводит к существенному снижению импульсного пробивного напряжения.

В ускорителе «СИНУС-6» также используется двухэлектродный разрядник на самопробое, работающий в импульсно-периодическом режиме. В работе [81] исследовались особенности работы и нестабильность разрядника при различных параметрах. Ширина разрядного промежутка изменялась от 1 до 4,5 см. Диаметр

электродов от 0,75 до 6,5 см. Давление газа от 1 до 16 атм. Описана зависимость стабильности работы разрядника от частоты. При низкой частоте следования импульсов разброс рабочего напряжения увеличивается, соответствуя одноимпульсному режиму по причине отсутствия влияния предыдущего разряда (отсутствие наработанных инициирующих электронов). При большой частоте следования импульсов влияют газодинамические возмущения и остаточная плазма от предыдущего разряда, которая не успевает вынестись потоком газа из области разряда в промежуток между импульсами.

В [58] также исследовалась стабильность работы частотного разрядника в режиме самопробоя. Частота работы разрядника при работе до 300 кВ и коммутируемой энергии до 450 Дж составляла 10 Гц. За счет коронного разряда в предпробойной стадии была достигнута стабильность срабатывания на уровне не менее 10 %. Показано, что причиной нестабильности срабатывания является наработка окислов азота в разряднике. Для уменьшения концентрации окислов применена продувка рабочего газа, приведены оценочные расчеты необходимых потоков газа.

Также имеется обзорная статья [87], где описаны несколько разрядников на самопробое.

1.5.4 Трехэлектродные разрядники. Разрядники с искажением поля. Устройство трехэлектродного разрядника показано на рисунке 12. Зачастую электрод 1 заземляется через нагрузку, а электрод 2 соединяют с источником высокого напряжения U, поэтому он является высоковольтным. Промежуток 2-3 выбран таким образом, чтобы не пробиваться при напряжении U, а промежуток 1-3 выбран, чтобы не пробиваться под действием напряжения пускового импульса. В момент подачи на электрод 3 пускового импульса напряжения с полярностью противоположной U происходит пробитие промежутка 2-3 и электрод 3 принимает потенциал U. Известно, что, увеличивая амплитуду и крутизну запускающего импульса напряжения возможно уменьшить время задержки трехэлектродного разрядника. Так при фронте в 40÷50 кВ/мкс и амплитуде запускающего импульса 50÷70% от U разброс времени $t_з$ получается порядка $\pm 10^{-8}$ с [14]. Также

эффективность запуска зависит от напряженности поля, создаваемой запускающим импульсом на кромке поджигающего электрода, которая зависит как от амплитуды запускающего импульса, так и от радиуса кромки электрода [1, 15].

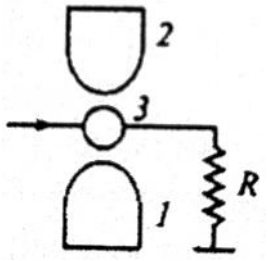
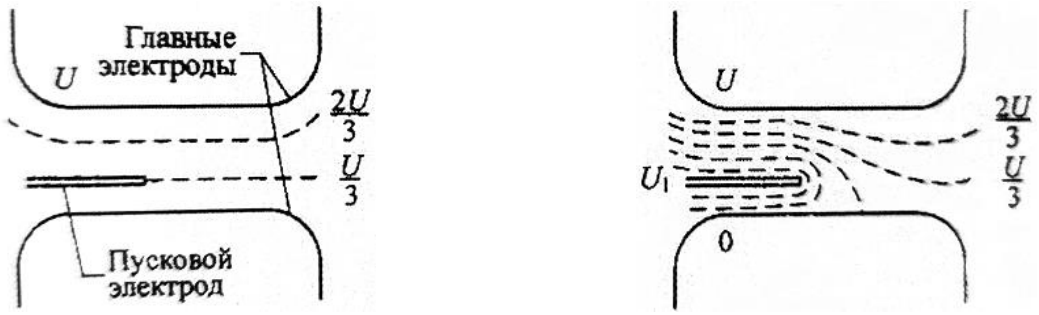


Рисунок 12 – Сематическое расположение электродов в трехэлектродном разряднике: 1 – заземленный электрод; 2 – высоковольтный электрод; 3 – управляющий электрод.

Относительно малым и стабильным временем срабатывания обладают разрядники работающие по принципу искажения поля [14]. На рисунке 13 приведен процесс искажения поля в таком разряднике. Запускающий электрод расположен между заземленным и высоковольтным электродами. На запускающем электроде, обычно выполненном из тонкого листа металла, повышенная напряженность изначально отсутствует, так как он имеет напряжение, равное эквипотенциали, вдоль которой он находится. Изменяет же его напряжение поданный на этот электрод запускающий импульс. Напряжение на нем обычно ниже потенциала ближайшего основного электрода. Это приводит к искажению естественных полей в междуэлектродном промежутке и возникновению очень сильной напряженности поля на кромке запускающего электрода, зажигается коронный разряд и появляется стример. В большинстве случаев пробой происходит сначала на промежутке в сторону высоковольтного электрода, после этого пробой происходит в сторону заземленного электрода.

Можно устанавливать запускающий электрод в середине промежутка, образованного основными электродами, однако для получения более высоких полей на кромке запускающего электрода нужно его расположить ближе к одному из основных электродов.

Искровой газовый разрядник с искажением поля применялся в первичном накопителе энергии ускорителя «Ангара-5» [88]. Индуктивность разрядника составляла 0.6 мкГн, рабочий газ – азот при давлениях 2÷8 атм. Рабочее напряжение до 170 кВ. Расстояние между электродами, выполненными из нержавеющей стали - 9÷11мм. Эксперименты выявили существенное преимущество использования положительной полярности поджигающего импульса.



а б

Рисунок 13 – Схема разрядника, работающего принципу «искажения поля». а - без пускового импульса, б – с пусковым импульсом. Запускающий электрод расположен на эквипотенциали U/3.

В [89] Ашмариным и Осиповым рассмотрены особенности конструктивного исполнения рельсового четырехканального разрядника с искажением поля, исследовались его временные характеристики. Показано, что наименьшая величина времени запаздывания и разброс времени запаздывания получились для разрядника с искажением поля при использовании двух управляющих электродов. Для рабочего напряжения до 40 кВ получено время запаздывания разряда $t_{зап}$=37,5 нс, джиттер ±4 нс, зона многоканального срабатывания ΔU=80%. Разрядник был заполнен сухим воздухом при давлении p = 0,3-0,5 МПа.

Также Ашмарин совместно с Блохинцевым в работе [65] проводили ресурсные испытания разрядника с искажением поля. Амплитуда токов, протекающих через разрядник, достигала 10^6 А.

В генераторе импульсного напряжения установки «СТЕНД-300» [90] использовался разрядник с искажением поля. Электроды разрядника имели тороидальную форму и были выполнены из нержавеющей стали. Исследовался

разброс расчетных значений характеристик разрядника с измеренными. Максимальное зарядное напряжение разрядника – 80 кВ. Междуэлектродный зазор равный 20 мм заполнялся азотом при давлении 1÷20 атм. Величина импульса управляемого напряжения имела амплитуду от 30 до 40 кВ. Разброс полученных значений хорошо согласуется с расчетными моделями и усредненно не превышает 15-20%.

Сонг и др. в работе [91] исследовали малогабаритный разрядник с искажением поля. Расстояние между электроды из нержавеющей стали имеющими тороидальную форму и запускающим электродом из тонкой пластины равнялось 4 мм. Разрядник наполнен газом до давления 0,4 МПа. В качестве рабочего газа использовались SF_6, N_2 либо смесь 70%N_2+30%SF_6. Разрядник работал на частоте до по Гц при напряжении до 110 кВ и токе около 8,5 кА. Получен джиттер в пределах 4 нс. Ресурс разрядника достиг 10^5 срабатываний.

Пекарь и др. в работе [92] разработали разрядник с искажением поля в котором управляющий электрод выполнен в виде иглы, а корпус изготовлен из оргстекла. При зарядном напряжении 100 кВ и энергии 6,5 Дж коммутируя ток в 25 кА разрядник, заполненный сжатым воздухом, выдерживает 1000 импульсов. Линейный размер иглы за это время уменьшился на 0,5 мм. Диапазон рабочих напряжений разрядника составляет 0,7.

1.5.5 Тригатроны. Тригатрон состоит из двух основных электродов (заземленного - 1 и высоковольтного - 2) и пускового электрода - 3, который вставлен вдоль оси прибора в виде изолированного от основных электродов металлического стержня (Рис. 14).

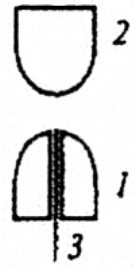


Рисунок 14 – Сематическое расположение электродов в тригатроне: 1 – заземленный электрод; 2 – высоковольтный электрод; 3 – управляющий электрод.

Известно, что время срабатывания тригатрона зависит от полярности запускающего импульса и меньше в том случае, если полярность запускающего импульса противоположна полярности незаземленного электрода. Время срабатывания и разброс срабатывания уменьшаются с уменьшением длительности фронта импульса запускающего напряжения по причине увеличения перенапряжения между электродами 1 и 3 [1, 14, 15].

В работе [93] Маркинсом показана возможность работы тригатронов с наносекундной стабильностью времени срабатывания при напряжениях до 10^6 В. Тригатрон коммутировал водяную линию с волновым сопротивлением 1,5 Ом заряженную до 1 МВ и формировал импульс длительностью в 70 нс с фронтом $t_ф$ = 20 нс. Корпус разрядника выполнен секционированным, с чередованием градиентных колец из алюминия и диэлектрических колец. Основной зазор составлял 3,4 см, поджигающий зазор 1,5 мм, диаметр поджигающего электрода 6 мм. Разрядник был заполнен элегазом до 5 атм. Импульс поджигающего напряжения с временем роста ≈ 0,5 мкс и амплитудой 40÷80 кВ имеет фронт несколько наносекунд. Поджигающий электрод выполнен таким образом, что он немного выступает над поверхностью основного электрода с целью уменьшения разброса времени срабатывания. Времена задержки срабатывания для поджигающего зазора ~ 10 нс, основного промежутка 20÷70 нс. В некоторых случаях разброс срабатывания изменялся ±1,5 нс.

Стоит отметить, что время между получением пускового импульса и началом роста тока в разряднике ($t_з$) для нескольких каналов (несколько параллельно расположенных запускающих электродов в теле основного электрода) заметно меньше, чем для одного канала. Объяснить это можно повышением вероятности зажигания хотя бы одного канала с меньшим временем запаздывания.

Капишников и Муратов представили [94] управляемый разрядник тригатронного типа, корпус которого выполнен из оргстекла. Все электроды выполнены из нержавеющей стали, а для повышения срока службы разрядника торцевые части всех электродов снабжены вставками из сплава на основе вольфрама. Рабочий газ N_2 либо смесь N_2 с Kr при давлении 2÷5 атм. Импульс

управляющего напряжения амплитудой 12÷15 кВ с фронтом ≤20 нс, полярностью противоположной основному импульсу. Срок службы тригатрона до 10^5 при рабочем напряжении до 70 кВ, амплитуде рабочего тока до 50 кА при коммутируемой энергии до 1 кДж. Частота работы до 100 Гц.

Евдокимович и др. [88] испытывали управляемый мегавольтный разрядник тригатронного типа с секционированным корпусом из чередующихся оргстеклянных и алюминиевых колец заполненным воздухом или смесью 10%SF_6+90%воздуха. Особенностью этого разрядника является поджигающий узел на основе диэлектрической втулки, вынесенной вглубь разрядного промежутка для уменьшения эрозии поджигающего электрода. Амплитуда основного импульса отрицательной полярности достигала 1,6 МВ (положительная полярность поджигающего импульса) с фронтом 1,5 мкс. Время запаздывания пробоя разрядника ≈ 1,5 мкс (Запускающий импульс $U_з$ = 120 кВ при длительности фронта $t_ф$ = 0,5 мкс). Расстояние между электродами 55 мм. Основным недостатком разрядника являются его габариты (высота 2,7 м, диаметр 1 м).

Хайлов исследовал стабильность работы тригатрона на ионном ускорителе ТЕМП-4М [95]. Проведен анализ стабильности работы двойной формирующей линии с водяной изоляцией при энергозапасе 1 кДж. Амплитуда запускающего импульса 60÷70 кВ. Управляющий электрод диаметром 3 мм расположен в центре заземленного электрода. Электроды из нержавеющей стали. Регулировка задержки времени пробоя основного разрядника изменялась длиной коаксиального кабеля. Задержка пробоя основного разрядника при отрицательной полярности составляла 25÷30 нс с джиттером 2÷6 нс.

Существует множество работ по исследованию и характеристикам тригатронов, в том числе сборники трудов и обзорные статьи [1, 14, 15, 84, 87]. При всех присущих тригатронам достоинствах анализ литературы позволяет говорить о недостаточном ресурсе тригатронов по причине износа поджигающего электрода.

1.5.6 Многоэлектродные разрядники. Устройства, где соединено несколько искровых разрядников называют последовательными многоэлектродными разрядниками. Впервые идею использования такого

разрядника предложил Гарднер, а Воробьев предложил использовать такую схему для укорочения фронта импульса, так как из-за большого перенапряжения можно получать малые времена коммутации [1]. Месяц [14, 96, 97] провел комплексное исследование разрядников такого типа и показал возможность создания коммутаторов с малым временем запаздывания и разбросом.

Воробьев и др. предложили коммутатор [98] имеющий одновременно высокую стабильность времени запуска, не прибегая к вспомогательным источникам, низкую амплитуду запускающего импульса, обладающий широким диапазоном рабочих напряжений при неизменных длинах междуэлектродных промежутков и сравнительно низкое давление рабочих газов (азот, аргон, воздух и др.) для времени коммутации 10^{-9} с. Длины зазоров составляли 100÷200 мкм. Высокая стабильность времени срабатывания от момента приложения запускающего напряжения до пробоя коммутатора обеспечивается тем, что после пробоя первого промежутка создается большое перенапряжение на последующих. Небольшая амплитуда запускающего напряжения обусловлена тем, что необходимо пробить один зазор с малым междуэлектродным расстоянием. Наблюдается многоканальный пробой по причине большого перенапряжения. При работе на напряжение до 40 кВ с амплитудой запускающего импульса 5 кВ нестабильность запуска составляла несколько наносекунд.

Ле Чиен и Гал исследовали разрядник, состоящий из семи тороидальных колец из нержавеющей стали диаметром 7,55 см, которые вместе с торцевыми пластинами корпуса, выполненными из алюминия, образуют восемь зазоров [99]. Величина каждого задора равнялась 0,6 см. Корпус из оргстекла наружным диаметром 11,4 см и длиной 24 см стягивается нейлоновыми шпильками. В центральной части просверлены отверстия для ввода газа и управляющего стержня. Рабочее напряжение разрядника 60 кВ с расчетной индуктивностью 175±18 нГн. Исследовалось количество зажигаемых каналов к каждом зазоре в зависимости от сорта газа, амплитуды и полярности напряжения. Выявлено, что смесь 10%SF_6+90%Ar образует больше каналов чем воздух. При повышении давления газа наблюдается увеличение числа каналов, в то же время амплитуда напряжения

поджигающего импульса (от -100 до +92 кВ) влияет на количество каналов незначительно.

Пекарь в работе [100] исследовал быстродействующую систему коммутации высоковольтного генератора импульсных напряжений с использованием многозазорных разрядников. Ширина зоны коммутации достигала 0,8, а время переключения ≈ 100 нс. В статье приведены формулы и расчетные кривые зоны коммутации от параметров многозазорного разрядника. Зарядное напряжение равнялось 250 кВ при числе искровых зазоров равном 12. Других параметров в статье не указано.

Лю и др. в своей работе [101] исследовали разрядник с количеством зазоров от двух до 8 для коммутируемого напряжения ≈35,5 кВ. При увеличении количества зазоров с 2 до 6 время нарастания коммутируемого тока уменьшилось с 13,5 до 6 нс. В работе не получилось точно измерить время нарастания тока 8 зазорного разрядника по причине отсутствия диагностического оборудования. Токовый зонд не позволял измерить фронт короче 3,5 нс.

Существует большая обзорная статья А. В. Харлова по многокулонным газовым разрядникам и их применению в импульсной технике [102], где можно уточнить некоторые детали расчета и конструкции многозазорных разрядников.

1.5.7 Разрядники-обострители. Тип неуправляемых металлокерамических отпаянных разрядников с повышенным давлением газа. Известно, что при формировании наносекундного импульса на длительность его фронта влияет множество параметров, среди которых расстояние междуэлектродного промежутка и его геометрия, сорт наполняющего газа и его давление. Также на фронт влияет разрядный контур, в который входит разрядник. Основное назначение разрядников-обострителей – формирование высоковольтных импульсов наносекундной длительности в высоковольтных импульсных устройствах. Основным преимуществом разрядников-обострителей является возможность значительно уменьшить габаритные размеры и массу генератора коротких импульсов, а также создать малоиндуктивные разрядные контуры. Промышленные разрядники имеют электроды из сплава ВНЖ-7-3 и наполнены водородом при

давлении 35÷40 атм [40]. Базовая конструкция металлокерамического разрядника, наполненного газом (как правило водородом) под высоким давлением для импульсных источников рентгеновского излучения рассмотрена в работе [103].

Разрядники-обострители сохраняют работоспособность при изменении температуры окружающей среды от -60 до +50 °С, а также устойчивы к ударным и вибрационным нагрузкам.

Маханько в работе [104] рассматривает технические возможности изготовления разрядников-обострителей на рабочее напряжение до 500 кВ. Для этого в конструкцию внесены некоторые изменения. Давление рабочего газа внутри отпаянного корпуса достигает 120 атмосфер. Разрядник способен коммутировать энергию в 20 Дж на частоте повторения импульсов до 50 Гц. Диаметр разрядника получился равен 80 мм, а его высота 115 мм. Место соединения анода с корпусом разрядника-обострителя помимо аргонно-дуговой сварки усилено резьбовым соединением. Также в конструкции предусмотрены защитные экраны, предотвращающие запыление керамического изолятора в процессе работы. Обеспечен ресурс не менее $3x10^6$ импульсов. В работе [77] Маханько исследует электрическую прочность конструкции вышеописанного разрядника-обострителя. Определены взаимосвязи между конструктивными элементами разрядника и электрической прочностью керамического корпуса против пробоя по поверхности, а также пробою промежутка между высоковольтным выводом и металлическими частями корпуса.

Динамика запыления внутренней поверхности изолятора продуктами эрозии электродов при использовании защитного экрана и ресурс разрядников-обострителей серии РО-43 и РО-49 изучены в работе [63]. Также изучен химический состав и микроструктура поверхности электродов и материала, осажденного в процессе работы на внутренних поверхностях корпуса методом сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа. Химический состав материала, осевшего на поверхности керамического изолятора соответствует материалу электродов. Установлено, что по причине запыления

поверхности керамического изолятора ресурс разрядника-обострителя ограничивается на уровне $3x10^6$ импульсов.

Более подробно про технические аспекты изготовления разрядников-обострителей, а также расчеты механической прочности и моделирование деформаций после приложения нагрузки в следствие заполнения корпуса газом при сверхвысоком давлении можно узнать из диссертации Маханько [45].

При несомненных достоинствах таких как пикосекундный фронт коммутируемого импульса и разброс срабатывания по напряжению порядка нескольких наносекунд разрядники-обострители обладают несколькими существенными недостатками, например низкая коммутируемая энергия и отсутствие управления.

1.6 Выводы по главе

При разработке управляемых и неуправляемых разрядников важны следующие характеристики и параметры:

- допустимая коммутируемая энергия;
- максимально допустимая амплитуда и длительность импульса тока;
- предельная частота повторения импульсов;
- среднее внутреннее сопротивление (относительные потери мощности в приборе);
- собственная индуктивность;
- сопротивление изоляции;
- междуэлектродная емкость;
- термостойкость;
- устойчивость к воздействию механических нагрузок;
- долговечность.

Для неуправляемого разрядника также необходимо учитывать напряжение пробоя и его максимальный разброс в течение всего срока эксплуатации. Для управляемого разрядника необходимо учитывать диапазон рабочих напряжений,

время запаздывания пробоя основного промежутка относительно подачи напряжения управляющего импульса, а также разброс времени срабатывания и параметры напряжения управляющего импульса.

Проведенный обзор дает понимание, что для повышения стабильности срабатывания разрядников, уменьшения времени развития разряда и уменьшения эрозии электродов нужно:

- Увеличивать перенапряжение на промежутке (импульсная зарядка накопителя);
- Инициировать разряд мощной подсветкой (больше энергии за меньшее время);
- Повышать давление газа;
- Усиливать неоднородность поля на катоде (усиливать выход электронов из катода вплоть до автоэмиссии);
- Уменьшать длину искрового промежутка;
- Добиться конструктивного экранирования внутренних поверхностей разрядника в том числе изоляторов от попадания продуктов эрозии электродов для увеличения ресурса.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что по совокупности характеристик разрядника (коммутируемая энергия, рабочее напряжение, частота, ресурс и т.д.) трудоемкости изготовления и настройки, а также по конечной стоимости изготовления и эксплуатации для целей реализации проекта оптимальным вариантом является искровой трехэлектродный разрядник с искажением поля, работающий в среде сжатого газа, обеспечивающий многоканальную коммутацию. Несмотря на большое количество научной литературы, найти универсальных (неоспоримых) решений по расчету и созданию подобного рода разрядников не удалось. Единственным решением является его проектирование и проведение комплексного научного исследования параметров для того, чтобы выявить наиболее оптимальное соотношение параметров разрядника в проектируемой установке.

Для обострения фронта импульса напряжения, генерируемого формирующей линией перспективным, является использование серийно выпускаемых двухэлектродных неуправляемых разрядников со сверхсжатым газом (обострителей). Ввиду их массогабаритных параметров, короткого время коммутации на уровне сотен пиколсекунд, а также герметичности корпуса, позволяющих использование непосредственно в объёме жидкостных формирующих линий, что обеспечивает минимальную индуктивность разрядного контура. Это не приведет к затягиванию фронта импульса. При этом малая величина коммутируемой энергии, указанная производителем, может быть нивелирована увеличением количества параллельно включенных разрядников. Однако в литературе отсутствуют исследования по разбросу времени срабатывания относительно друг друга при параллельном включении данного типа разрядников и их максимальной коммутируемой энергии. Следовательно, проведение исследований в этом направлении способно дать импульс использованию серийно производимых разрядников со сверхсжатым газом в качестве обострителей фронта импульса в сильноточной высоковольтной технике.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В экспериментах при исследовании коммутационных характеристик работы искрового разрядника со сжатым газом использовался специально спроектированный мощный импульсный ускоритель, состоящий из генератора наносекундных импульсов с накопителем энергии на основе низкоимпедансной двойной формирующей линий. Для изначального проектирования и распределения электрических полей внутри корпуса разрядника использовался комплекс программ для моделирования, электромагнитных, тепловых и механических задач – ELCUT. Для регистрации сигналов импульсов напряжения и тока использовались двухкаскадные делители напряжения, встроенные в формирующие линии и пояса Роговского интегрированные в корпуса разрядника и формирующих линий. Далее сигналы обрабатывались и визуализировались осциллографическими комплексами (Tektronix, RIGOL, GW INSTEK). Оценка многоканальности пробоя в разряднике оценивалась визуально, подсчетом следов от искрового канала на поверхности электродов после каждого срабатывания, либо серии из нескольких срабатываний. Велось фотографирование поверхности электродов для последующего анализа характера многоканальности искрового разряда и эрозии электродов. Состав газовой смеси и давление выставлялось вручную посредством газовой системы, собранной из газовых редукторов, накрученных на баллоны с газом и стрелочных манометров.

2.1 Малогабаритный, мощный импульсный ускоритель на основе низкоимпедансной двойной формирующей линии с рабочим напряжением 160 кВ

Установкой, на которой проводились исследования был малогабаритный ускоритель заряженных частиц, схема которого представлена на рисунке 15. Ускоритель состоит из высоковольтного импульсного источника (зарядный генератор) [105], низкоимпедансной коаксиальной двойной формирующей линии

(ДФЛ) в качестве жидкого диэлектрика в ней используется глицерин импульсной электрической прочностью не ниже 200 кВ/см, а также очень высокой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon \approx 42.5 \div 47$ при комнатной температуре) . ДФЛ переходит в вакуумную камеру, внутри которой в качестве нагрузки закреплена диодная система. Диодная система выбирается в зависимости от решаемых ускорителем задач и не рассматривается в рамках данной работы, поэтому в качестве нагрузки ДФЛ при проведении исследований использовалась короткозамкнутая либо резистивная согласованная нагрузка. Также причиной исследований на этом ускорителе является желание провести испытания ДФЛ, которая в дальнейшем будет использована в качестве накопителя энергии проектируемого ускорителя в рамках государственного задания.

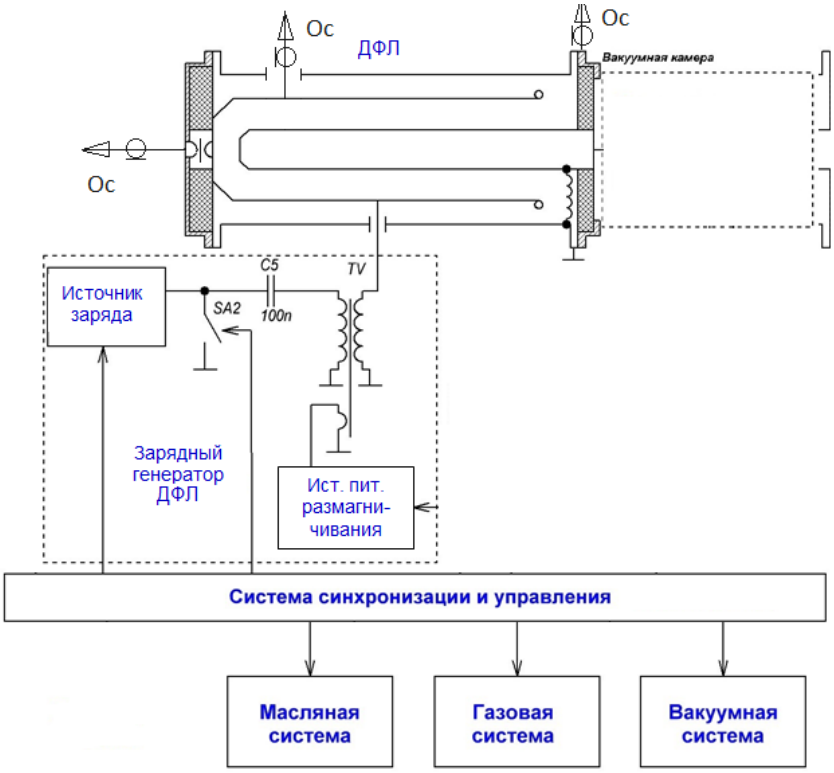


Рисунок 15 – Сема ускорителя

Вакуумный объем рабочей камеры отделен от жидкостного объема ДФЛ посредством проходного секционированного изолятора, изготовленного из диэлектрических колец из оргстекла, чередующихся с алюминиевыми градиентными кольцами [106]. Рабочее напряжение ускорителя до 160 кВ;

максимальный коммутируемый ток в разряднике до 35 кА; импеданс линии 10 Ом; длительность импульса 40 нс.

Внешний вид ускорителя представлен на рисунке 16.

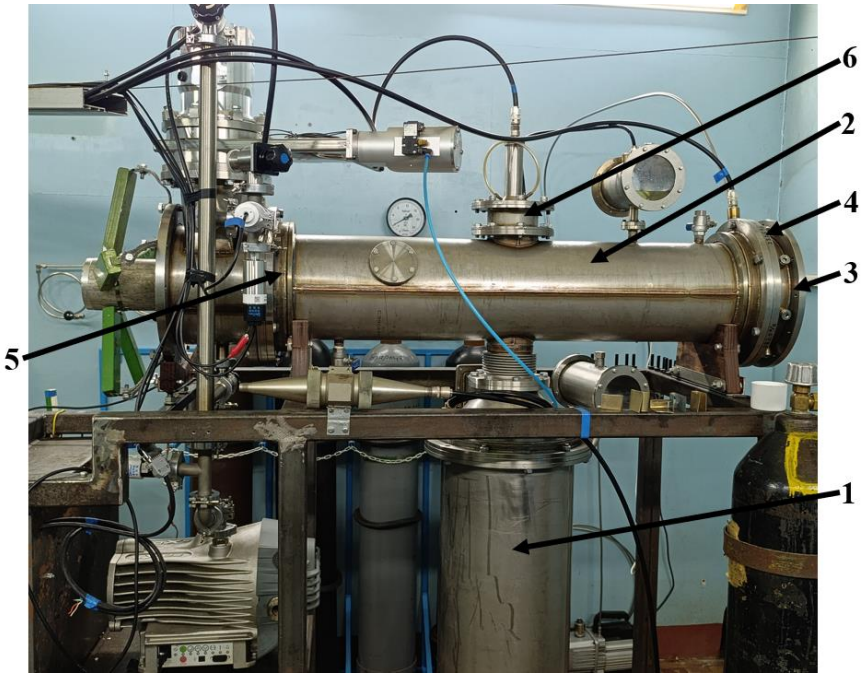


Рисунок 16 – Фотография экспериментального стенда: 1 – высоковольтный импульсный источник; 2 – ДФЛ; 3 – узел коммутатора; 4, 5 – пояс Роговского; 6 – двухкаскадный делитель напряжения.

В качестве нагрузки для коммутатора выступает двойная формирующая линия, выполненная из нержавеющей стали. Диаметр корпуса ДФЛ составляет 227 мм. Запасамая энергия ≈ 200 Дж; сопротивление коммутируемого плеча 4,45 Ом; время зарядки ≈ 600 нс. Линия заряжается отрицательной полярностью напряжения. Время зарядки определяется высоковольтным импульсным источником (зарядным генератором), который используется для генерирования мощных импульсов микросекундной и наносекундной длительности и состоит из корпуса в котором размещены коммутирующий элемент (псевдоискровой разрядник), емкостный накопитель состоящий из 4 параллельно соединенных конденсаторов К75-74 (ЭЛКОД) с номинальным напряжением 40 кВ и емкостью 0,1 мкФ, импульсный трансформатор выполненный в виде двух параллельно соединенных спиралей охватывающих магнитопровод. Первичная обмотка

импульсного трансформатора образована шиной из нержавеющей стали, размещенной в окне магнитопровода и медными шинами, расположенными вдоль корпуса. Один конец шины, проходящей в окне магнитопровода соединен с выводами конденсаторной батареи, другой с медными шинами и катодом псевдоискрового разрядника. Вторичная обмотка выполнена в виде двух параллельных самонесущих спиралей из меди, расположенных вокруг магнитопровода. Один конец спиралей соединен с конденсаторной батареей, другой идет к выводу. Основные параметры источника: Рабочее напряжение до 160 кВ; энергия, запасаемая на максимальном напряжении ≈ 200 Дж; время зарядки формирующей линии ≈ 600 нс. Высоковольтный импульсный источник в свою очередь заряжается от источника постоянного тока.

Газовая система (рис. 17) позволяет использовать в разряднике чистые газы и газовые смеси до давления в 20 избыточных атмосфер. Система газовых редукторов высокого давления (РВД-30/3 заводаKRASS) и стрелочных манометров МВТИФ (Физтех), соединенных трубкой из нержавеющей стали, имеет возможность изготовления смеси из пяти различных газов. Для удаления нежелательных примесей из объема разрядной камеры существует возможность предварительного разряжения атмосферы методом безмаслянной откачки спиральным насосом Edwards nXDS10i до давления (≈10 Па).



Рисунок 17 – Газовая система.

Зарядное напряжение ДФЛ (напряжение на выходе высоковольтного импульсного источника) и форма падения напряжения при замыкании искрового промежутка разрядника были измерены двухкаскадным делителем напряжения (рис. 18). Делитель установлен в ДФЛ (позиция 6 на рис. 16) диаметрально противоположно узлу подключения зарядного генератора на расстоянии ≈ 500 мм вдоль оси ДФЛ от исследуемого разрядника. Первый каскад делителя напряжения жидкостный на водном растворе соли KCl, второй каскад резистивный на основе сборки металлопленочных одноваттных резисторов MF-1. Полный коэффициент деления 2170.

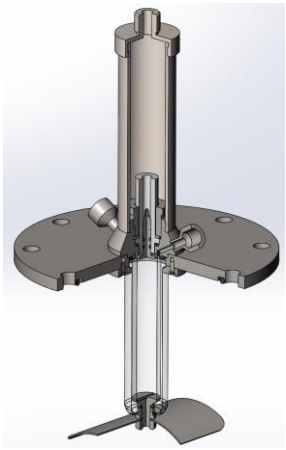


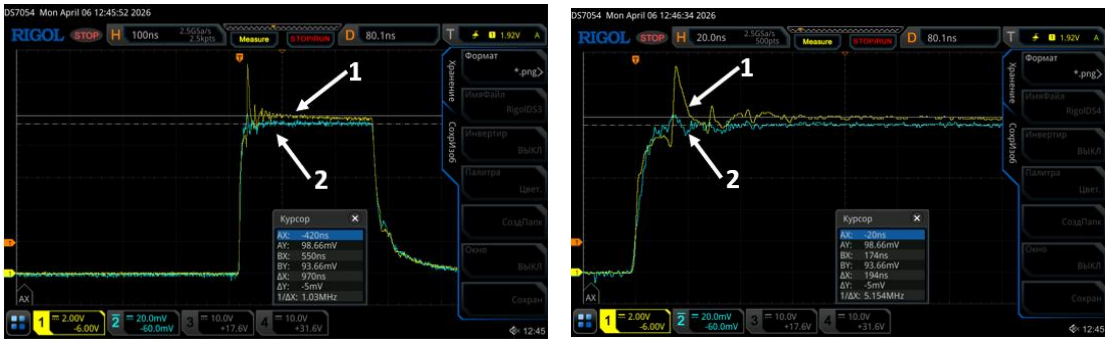
Рисунок 18 – Двухкаскадный делитель напряжения.

Ток при коммутации разрядника и ток перед переходом линии в вакуумный обем (ток в нагрузке) измеряли поясами Роговского (рис. 19) без обратного витка и интегратора (работающими в режиме трансформатора тока). Все пояса Роговского откалиброваны и могут детектировать импульс тока с фронтом нарастания 2 нс и длительностью 250 нс. Пояс Роговского измеряющий коммутируемый ток находился в непосредственной близости от электродов (позиция 4 на рис. 16) и конструктивно интегрирован в корпус разрядника (коэффициент 283,5 А/В). Пояс Роговского измеряющий ток в нагрузке (позиция 5 на рис. 16) имел коэффициент 323 А/В находился во фланце, непосредственно на выходе формирующей линии, перед фланцем вакуумной камеры.



Рисунок 19 – Внешний вид пояса Роговского.

Калибровка двухкаскадных делителей напряжения и поясов Роговского производилась на специализированном стенде, основой которого является генератор калибровочных импульсов. На рисунке 20 приведена осциллограмма сравнения сигналов калибровочного импульса и измеренного поясом Роговского.



а б

Рисунок 20 – Сравнение калибровочного (1) и измеренного сигналов (2). Длительность импульса ≈ 250 нс (а), фронт нарастания импульса ≈ 2 нс (б).

Сигналы с датчиков тока и напряжения передаются в пультовую комнату по кабелям РК 50-7-12 длиной 12,5 м.

Для визуализации и регистрации сигналов с датчиков тока и напряжения использовался восьмиканальный осциллограф Tektronix MSO58LP с полосой пропускания 1 ГГц, частота дискретизации: до 6.25 Гвыб/с. Для обработки осциллограмм использовался пакет программ для численного анализа данных и построения научной графики – Origin. Типовая осциллограмма напряжения и тока в разряднике в момент его срабатывания представлена на рисунке 21.

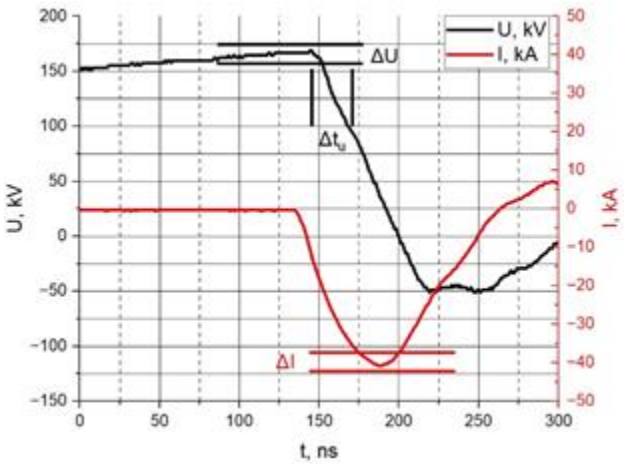


Рисунок 21 – Типовая осциллограмма напряжения и тока.

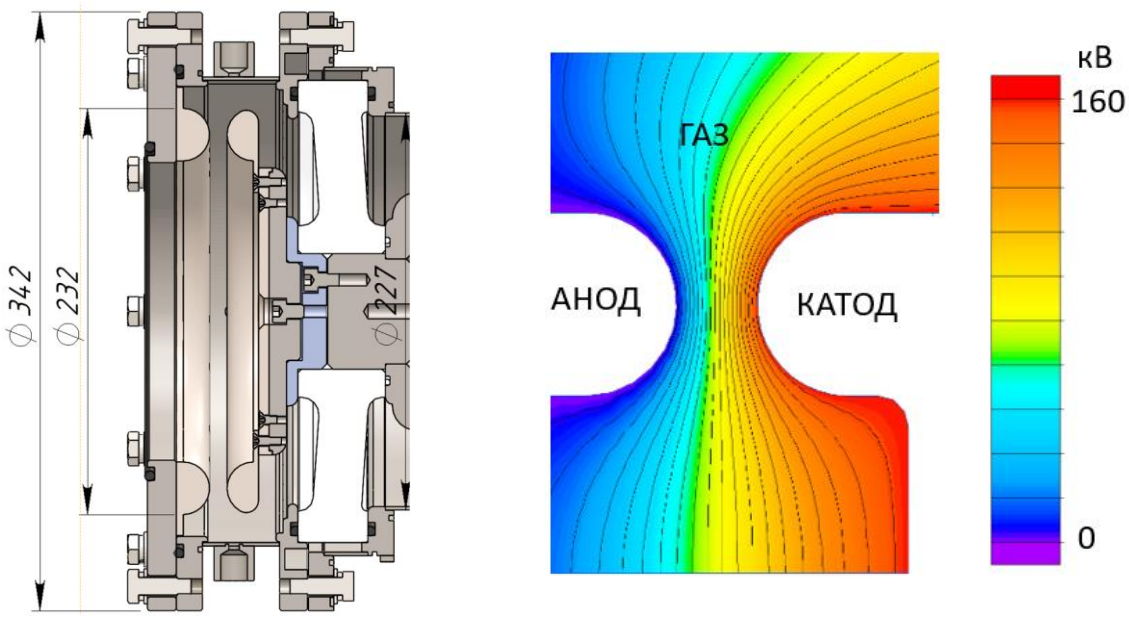
Оборудование позволяет проводить измерения напряжения и полного тока разрядника с погрешностью не хуже 10 %.

2.2 Расчет электрического поля и индуктивности разрядника

Для исследования узла разрядника предварительно был проведен итерационный расчёт 3D модели с целью добиться равномерного распределения электрического поля вдоль искрового промежутка. Расчёт конфигурации разрядника производился на полное рабочее напряжение равное 160 кВ. За основу принята конструкция двухэлектродного разрядника с электродами из нержавеющей стали, представленная на рисунке 25. Для двухэлектродной конструкции проводился расчет распределения электрического поля, с последующим добавлением третьего электрода и оценкой влияния его на форму электрического поля.

Перед изготовлением узлов и деталей разрядника проводился итерационный расчет формы электрического поля, а также распределения падения напряжения в искровом промежутке и напряженности электрического поля как вблизи электродов, так и в междуэлектродном промежутке в целом. Расчет проводился с целью получения значений падения напряжения и напряженности электрического поля в междуэлектродном промежутке, которые не должны иметь резких скачков значений. Электрическое поле в междуэлектродном промежутке

конфигурировалась посредством изменения формы и размера токопроводящего корпуса третьего (искажающего) электрода, а также формой и диаметром диэлектрического изолятора искажающего электрода. Расчёт распределения напряжения и напряженности электрического поля в искровом промежутке осуществлялся в программном комплексе ELCUT [107], который представляет собой интегрированную диалоговую систему программ, позволяющую решать плоские и осесимметричные задачи. В результате расчета на экран монитора компьютера выводится изображение (рис 25 б.) с конфигурацией электрического поля в корпусе разрядника с визуализацией эквипотенциальных линий с заданным шагом. Так же строились графики распределения напряжения и напряженности электрического поля в междуэлектродном зазоре. На рисунке 26 приведены графики значений напряжения и напряженности электрического поля в зазоре двухэлектродного разрядника.

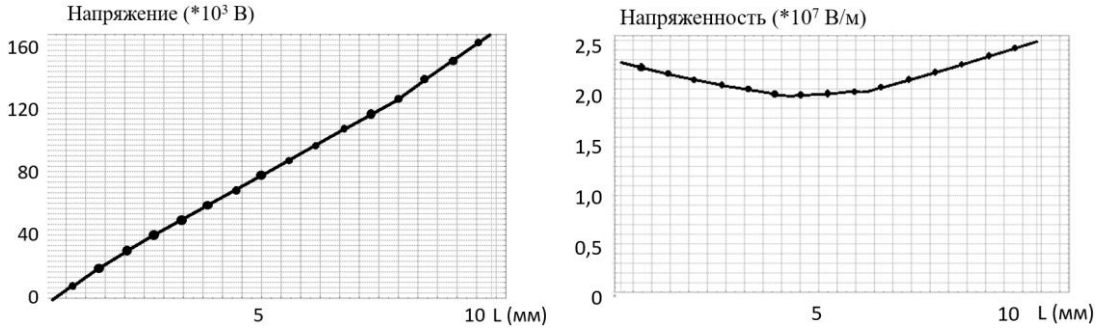


а б

Рисунок 25 – Конструкция двухэлектродного разрядника(а), распределение электрического поля в искровом зазоре двухэлектродного разрядника (б).

Пробивное напряжение и электрическая прочность напрямую зависят от формы электрического поля в междуэлектродном промежутке. Путем равномерного распределения электрического поля в междуэлектродном

промежутке можно существенно повысить максимальное пробивное напряжение. Формы электрических полей подразделяются на однородные, слабонеоднородные и резконеоднородные.



а б

Рисунок 26 – Распределение напряжения (а) и напряженности (б) в межэлектродном зазоре двухэлектродного разрядника.

Коэффициент неоднородности Кн характеризует степень неоднородности электрического поля между электродами. Коэффициент неоднородности равен отношению максимальной напряженности Емакс к средней напряженности Ecp поля между электродами:

$$\text{Кн} = \text{Емакс}/\text{Ecp} \quad (14)$$

Средняя напряженность поля между электродами равна отношению разности напряжений между электродами U к величине зазора l между электродами:

$$\text{Ecp} = U/l \quad (15)$$

Максимальная напряженность электрического поля зависит от нескольких параметров, таких как приложенное к электродам напряжение, конфигурация, размеры электродов и расстояние между ними. Коэффициент неоднородности для однородного поля $К_Н = 1$, для слабонеоднородного — $К_Н \leq 3$, для резконеоднородного — $К_Н > 3$ [108].

Расчет индуктивности разрядного контура проводился по методике, описанной Колонтаровым в [109].

Индуктивность разрядного контура рассчитывалась как сумма индуктивностей отдельных участков, по причине того, что они имеют разные

диаметры. Индуктивность цилиндрического корпуса коммутатора с расположенными внутри электродами можно расценивать как индуктивность однофазного коаксиального кабеля со сплошным внутренним проводом и полым наружным проводом (рис.27). При малой толщине наружного (полого) провода ($t = r - q \ll q$) и при весьма высокой частоте удобна формула:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{q}{p}, \tag{16}$$

Где μ_0 – магнитная постоянная (магнитная проницаемость); p – радиус внутреннего провода; q и r – внутренний и внешний радиусы наружного провода.

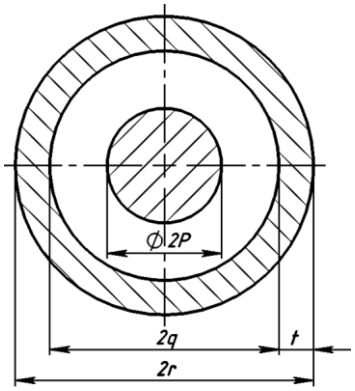


Рисунок 27 – Коаксиальный кабель со сплошным внутренним проводом и полым наружным проводом.

Расчет индуктивности искрового канала проводился по методике так же приведенной в [109]. Искровой канал в условно можно принять за прямолинейный провод кругового сечения, для него и рассчитывается индуктивность при весьма высокой частоте для коротких проводов:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{r}{l} - \frac{r^2}{2l^2} \right), \tag{17}$$

где, l – длина провода; r – радиус его поперечного сечения.

Также встает задача проведения расчета напряженно-деформированного состояния основного изолятора разрядника, отделяющего газовый объем от жидкостного объема формирующей линии. Для реализации этой задачи применяются численные методы расчета, реализованные в специализированных CAD системах. Механическая прочность изолятора рассчитывалась в программе

SolidWorks Simulation [110], которая позволяет осуществить анализ детали методом конечных элементов (МКЭ) при виртуальном тестировании CAD-моделей, а также проводить линейный статический, нелинейный статический и динамический анализы, с возможностью прогнозировать поведение детали при ее реальной эксплуатации.

В качестве исходных данных для проведения расчета выступают: 3D модель рассматриваемой детали; материал, из которого она изготовлена; действующие механические (давление) или термические нагрузки; ограничения движения всей модели.

После проведения расчетов численного моделирования получают результаты деформации и перемещений поверхностей модели в элементах сетки построенной на 3D модели. Точность результатов, получаемых в процессе расчета, зависит от параметров сетки конечных элементов. Качество сетки конечных элементов проверялось по эпюре качества сетки, за основу которой взята пропорция кромок элементов. Также при проверке сетки использовался коэффициент Якобиана [111], для которого использовали 16 точек внутри одного элемента.

2.3 Измерение коммутационных характеристик разрядника

Разрядник настраивался так, чтобы пробой происходил на уровне ≈ 0,9 от максимального напряжения зарядного генератора. Это вызвано тем, что при работе на максимальном зарядном напряжении можно ожидать высокую нестабильность и разброс величины напряжения срабатывания. В случае работы на меньшем уровне зарядного напряжения генератор будет работать в неоптимальном режиме, с увеличенным расходованием ресурса и малым КПД по причине большой остаточной «балластной» энергии.

Время нарастания фронта импульса тока в разряднике определяется как интервал между точками, соответствующими 10% и 90% установившегося значения на осциллограмме от точки появления сигнала до его максимального значения амплитуды.

Среднеквадратичное отклонение напряжения пробоя разрядников измерялось в серии 50÷100 импульсов с интервалом 10 с и сменой газа в разряднике через каждые 10 срабатываний для недопущения эффекта жестчения газа. Осциллограммы, полученные в ходе экспериментов, обрабатывались в профессиональном программном пакете Origin. Для определения среднеквадратичного отклонения напряжения пробоя, тока в разряднике и разброса времени срабатывания полученные осциллограммы накладывались одна на другую с последующим измерением интересующей характеристики (рис. 28)

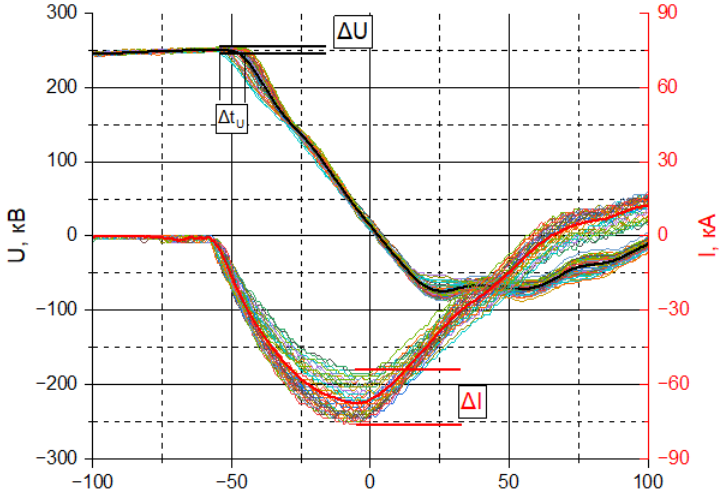


Рисунок 28 – Наложение осциллограмм от 50 срабатываний разрядника с указанием разброса напряжения ΔU, тока разрядника ΔI, а также времени начала падения напряжения Δt_U.

Оценка многоканальности срабатывания разрядника проводилась визуально посредством разборки коммутатора после каждого срабатывания или после серии из 10 срабатываний. Проводился подсчет количества отпечатков после воздействия искровых каналов на поверхность электродов и оценка эрозии поверхности. В качестве маркера контроля размеров и количества отпечатков искровых каналов на поверхности электродов в некоторых экспериментах наносился спирторастворимый краситель «нигрозин». Поверхность электродов окрашивалась перед каждым срабатыванием разрядника с последующей разборкой и фотографированием участков с эрозией материала после воздействия искровыми каналами (рис. 29). Отслеживать многоканальность разряда необходимо по

причине того, что отсутствие многоканальной коммутации приводит к увеличенной эрозии электродов и уменьшению ресурса разрядника [112].



а б

Рисунок 29 – Фотографии электродов с отпечатками (обведены окружностями) от искрового канала после пробоя. а – заземленный электрод; б – высоковольтный электрод.

2.4 Конструкция разрядника со сжатым газом для коммутации низкоимпедансной коаксиальной линии напряжением до 160 кВ

Два тороидальных электрода формировали основной разрядный промежуток. Заземленный электрод располагался на крышке корпуса разрядника, а высоковольтный электрод крепился к среднему электроду двойной формирующей линии. Диаметр основных тороидальных электродов выбирался из соображения обеспечения минимальной индуктивности разрядного контура. С одной стороны, для этого диаметр электродов должен был быть близок к диаметру корпуса разрядника, выполняющего роль обратного токопровода, с другой стороны, зазор между высоковольтным электродом и корпусом должен обеспечивать изоляцию их друг от друга. Исходя из вышеизложенного диаметр основных электродов разрядника, изготовленных из немагнитной нержавеющей стали, составил 232 мм при диаметре корпуса разрядника 264 мм. Это соотношение обеспечивает индуктивность данного участка на уровне 3 нГн без учета индуктивности искровых каналов. Также большой диаметр электродов позволяет выполнить одно из условий

формирования многоканального пробоя: время пробега волны напряжения вдоль электродов должно быть больше времени зарождения каналов пробоя в основном промежутке. В данной конструкции максимальное время пробега волны вдоль электродов составляет ~ 0.8 нс.

Искажающий электрод в виде диска крепился к высоковольтному электроду через изолятор, расположенный в центральной части корпуса разрядника таким образом, чтобы его кромка находилась между основными тороидальными электродами, но полностью не перекрывала основной зазор. Увеличение диаметра основных электродов позволило также повысить перенапряжение в основном междуэлектродном промежутке за счет использования предразрядника с шаровидными электродами из нержавеющей стали радиусом 40 мм. Один из электродов предразрядника соединен с третьим электродом основного разрядника, другой закреплен на заземленной крышке разрядника. Коэффициент перенапряжения необходим для уменьшения разброса срабатывания и обеспечения многоканальной коммутации между третьим и двумя основными электродами.

Предварительно один из электродов предразрядника был закреплен к заземленной крышке разрядника через изолятор (рис. 30), но из-за недостаточной конструктивной емкости между одним из электродов предразрядника и заземленной крышкой с установленным на ней электродом основного разрядника через междуэлектродный зазор предразрядника происходила основная коммутация на заземленный электрод минуя заземленный электрод основного разрядника. Конструкция была пересчитана и дополнена элементом конструктивной емкости в виде наваренной на крышку цилиндрической втулки из нержавеющей стали с вставленным внутрь капролоновым корпусом с интегрированным низкоиндуктивным сопротивлением величиной 50 Ом для предотвращения протекания тока основного разряда через электроды предразрядника. Для настройки зазора между электродами предразрядника в конструкции предусмотрен узел подстройки в виде резьбовой втулки. Также при проектировании исследуемого узла разрядника учитывалась конструктивная защита изолятора разделяющего газовый объем разрядника и жидкостный объем линии от запыления

продуктами эрозии электродов. Из литературы (глава 1) известно, что ресурс разрядника в значительной степени сокращается в следствие оседания проводящего слоя на поверхность изолятора. Проводящий слой образуется продуктами эрозии металлических электродов в процессе воздействия на них искровых каналов и их соединениями с рабочим газом. Конструктивная защита изолятора от запыления выполнена в виде защитного экрана, расположенного на фланце корпуса разрядника позиция 11 на рисунке 31.

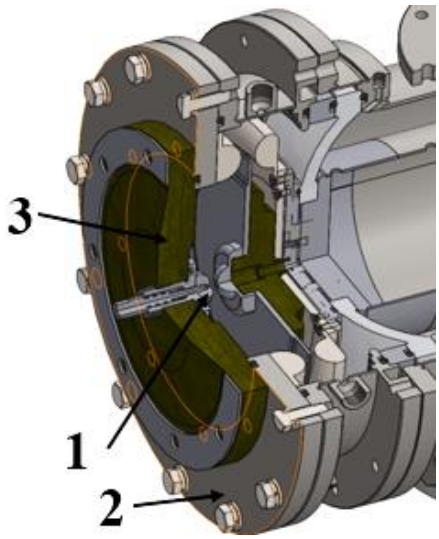
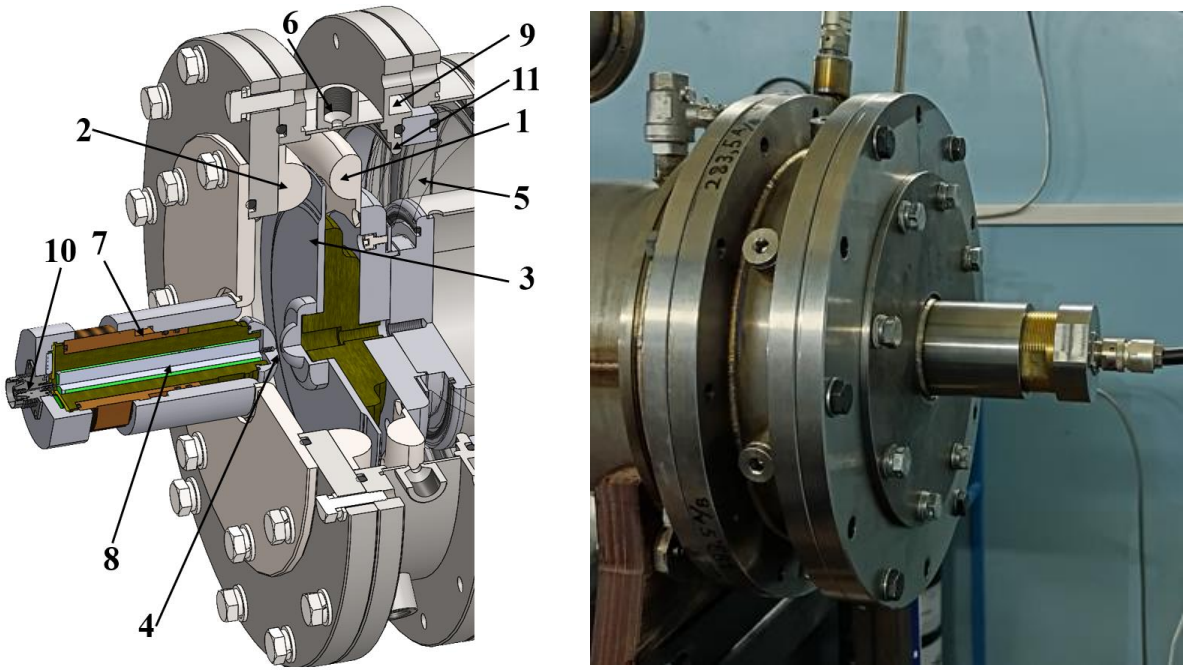


Рисунок 30 – Узел разрядника. Электрод предразрядника 1 закреплен к заземленному корпусу 2 через диэлектрическую пластину 3.

Итоговая модель и фотография трехэлектродного газового разрядника с предразрядником и измерительным токовым шунтом представлена на рисунке 31.

Схема с измерительным токовым шунтом, основанная на резисторе R, позволяет зафиксировать точный момент пробоя газового зазора в предразряднике, оценить время от срабатывания зазора предразрядника до срабатывания основного зазора разрядника и скорость нарастания тока. Резистор ТВО-5 (50 Ом) выбран в измерительном токовом шунте благодаря своей объемной композитной структуре, которая обеспечивает минимальную собственную индуктивность и высокую импульсную энергоемкость. Ток протекает равномерно по всему объему углеродного цилиндра. Это минимизирует паразитную индуктивность шунта.

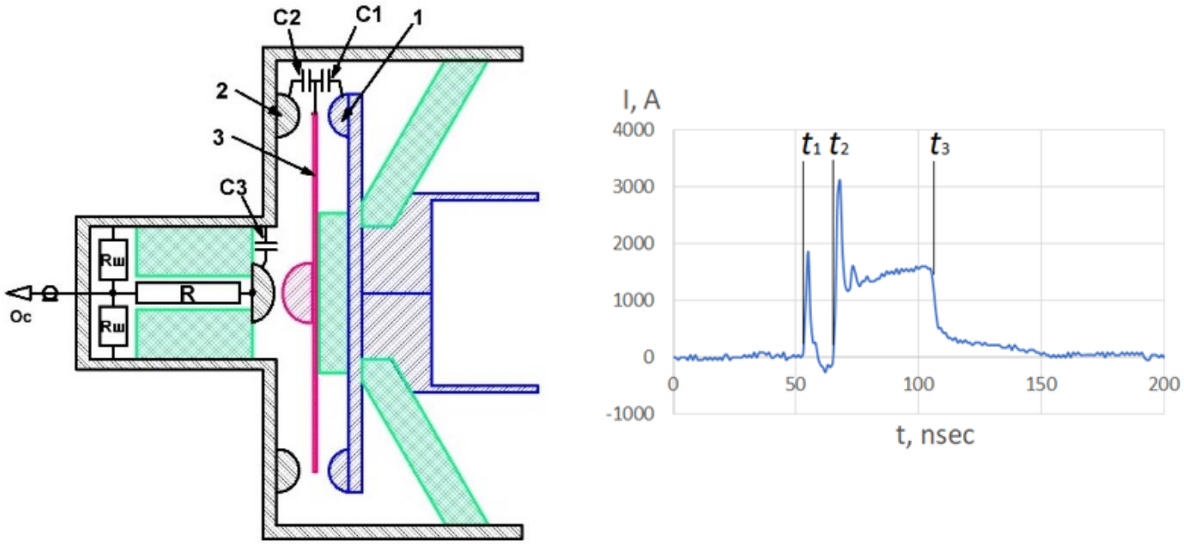


а б

Рисунок 31 – Разрез 3D модели трехэлектродного газового разрядника (а) и узел разрядника, установленный на ускорителе (б). 1 – высоковольтный электрод, 2 – заземленный электрод, 3 – третий электрод (искажающий), 4 – предразрядник, 5 – низкоиндуктивный изолятор, 6 – штуцер для подачи газа, 7 – узел настройки зазора предразрядника, 8 – низкоиндуктивный резистор марки ТВО-5 (50 Ом), 9 – пояс Роговского, 10 – разъем измерительного токового шунта, 11 – защитный экран изоляторазрядника.

Инициирующий неуправляемый двухэлектродный предразрядник, состоящий из двух шарообразных электродов, один из которых крепился непосредственно на среднем искажающем электроде. Второй электрод был закреплен на изоляторе и через токоограничивающий резистор (R), и с последовательно включенным ему токовым шунтом соединялся с заземленным корпусом. Токовый шунт выполненный из низко индуктивных радиально расположенных резисторов (Rш) обеспечивает измерение всех временных характеристик работы разрядника. Токоограничивающий резистор необходим для предотвращения протекания всего тока разряда формирующей линии через предразрядник, его сопротивление должно быть много больше сопротивления коммутируемого плеча, чтобы избежать «проседания» потенциала среднего

электрода при коммутации промежутка между высоковольтным и средним электродами. Схема разрядника и характерная осциллограмма с шунта представлены на рисунке 32.



а б

Рисунок 32 – Схема разрядника (а), характерная осциллограмма тока через шунт (б). 1 – высоковольтный электрод, 2 – заземленный электрод, 3 – третий электрод (искажающий).

При заряде формирующей линии потенциал среднего электрода определяется соотношением конструктивных емкостей С1 и С2 величина которых равнялась ~ 30 пФ и ~ 18 пФ соответственно. При достижении средним электродом потенциала пробоя происходит разряд емкости С2 на емкость С3 и как следствие изменение потенциала среднего электрода до более низкого значения. Емкость С2 должна быть минимум в 2 раза меньше емкости С3, а длина пробега волны туда обратно вдоль корпуса предразрядника больше времени перезаряда емкости С2. В разработанном разряднике величина емкости С3 составляла ~ 40 пФ при этом время разряда емкости С2 составляло ~ 1,8 нс, а время пробега волны туда обратно ~ 2 нс. В этом случае потенциал среднего электрода после разряда емкости С2 будет близок к нулю. На осциллограмме тока разряд емкости С2 на емкость С3 соответствует моменту начала протекания тока через шунт отмечено t1 на рисунке 32 б. и до окончания его протекания. Момент времени t2 на осциллограмме

соответствует моменту начала пробоя зазора между средним и высоковольтным электродами в связи с увеличением напряжения на этом промежутке за счет изменения потенциала среднего электрода. В этот момент ток разряда формирующей линии замыкается через токоограничивающее сопротивление. В момент, когда ток через шунт начинает уменьшаться (t3 – на осциллограмме) и до его полного окончания формируется пробой промежутка между средним и заземленным электродами, в следствии увеличения потенциала среднего электрода до потенциала высоковольтного электрода. Это приводит к появлению на зазоре напряжения больше напряжения пробоя. Время запаздывания пробоя основного промежутка, от момента начала пробоя предразрядника, определяется как t2-t1, при этом время формирования пробоя в основном промежутке равно t3-t2.

2.5 Выбор материала и формы изолятора для достижения требуемых прочностных параметров и минимизации индуктивности

Индуктивность разрядного контура является одним из основных параметров разрядника, определяющих время нарастания фронта тока. Форма изолятора разделяющего объем разрядника и жидкостный объем формирующей линии напрямую влияет на суммарную индуктивность разрядного контура.

Низкая индуктивность способствует получению более короткого фронта нарастания тока, а процессы, происходящие за пределами коммутационного узла ускорителя во многом связаны с крутизной фронта нарастания тока. В частности, длительность нарастания тока при коммутации формирующей линии определяет режим ее работы, и более короткий фронт не дает формирующей линии работать в режиме емкостной моды. Процессы, происходящие в нагрузке ускорителя, зависят от длительности фронта нарастания тока, в частности работая с диодом Люса при коллективном ускорении ионов, на принципах которого предполагается работа проектируемого ускорителя. Более короткий фронт тока положительно сказывается на уровне динамических потерях. Процесс коммутации можно разделить на несколько этапов. На начальном этапе присутствует напряжение при

полном отсутствии тока, в дальнейшем происходит нарастание тока одновременно с падением напряжения до момента, когда ток становится максимальным, а напряжение падает до нуля. В момент времени, когда уровни тока и напряжения достигают примерно половины от максимальных значений, наступает переходной процесс. Чем дольше длится переходной процесс, тем больше уровень динамических потерь, а следовательно, понижается КПД установки в целом.

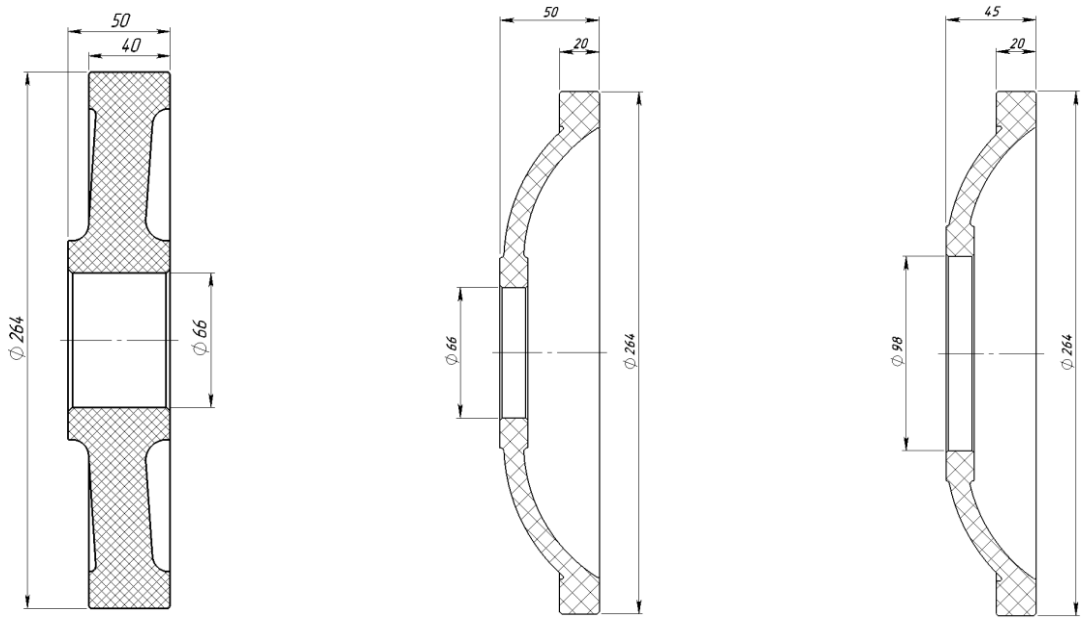
В конструкции двойной формирующей линии данный изолятор помимо основной функции выполняет еще и функцию держателя для средней трубы, висящей на изоляторе консольно. Это накладывает на него дополнительную нагрузку, так как при провисании трубы изменится волновое сопротивление всей линии. По причине того, что разрядник работает в атмосфере сжатого газа, повышенное давление внутри разрядника может изменять линейные размеры изолятора тем самым изменяя междуэлектродное расстояние, что необходимо учитывать при работе установки в целом.

Суммируя вышесказанное необходимо максимально уменьшить индуктивность изолятора разрядника, не потеряв при этом необходимой прочности. Максимально уменьшить индуктивность можно, исключив изолятор из конструкции (см. главу 1), это предполагает наличие общего объема разрядника и линии, но конструкции с жидкостной линией и газовым разрядником это не представляется возможным.

В качестве изолятора, разделяющего газовый объем коммутатора и жидкостной объем линии возможно использование следующих доступных к приобретению материалов: фторопласт, полиэтилен, капролон или блочный акриловый полимер (оргстекло). По совокупности физико-механических свойств и гидрофобности в качестве материала изолятора выбран блочный акриловый полимер марки ТОСН, как материал, не меняющий свойств при взаимодействии с водой и обладающий наивысшим модулем упругости среди доступных листовых диэлектриков, что минимизирует прогиб под давлением. Для компенсации хрупкости материала при данном давлении необходим расчет конструкции

изолятора на запас прочности. В то же время высокие диэлектрические свойства (200-300 кВ/см) обеспечивают надежную электрическую изоляцию.

Чтобы обеспечить механическую прочности при минимизации линейных размеров выбран изолятор куполообразной формы. Также с целью дальнейших исследований влияния индуктивности элементов разрядного контура на многоканальность разряда и другие коммутационные характеристики было решено провести расчет и изготовление трех изоляторов, отличающихся линейными размерами (рис.33).



а б в

Рисунок 33 – Основной изолятор разрядника. а – базовая версия изолятора, б – промежуточная версия, в – низкоиндуктивная версия изолятора.

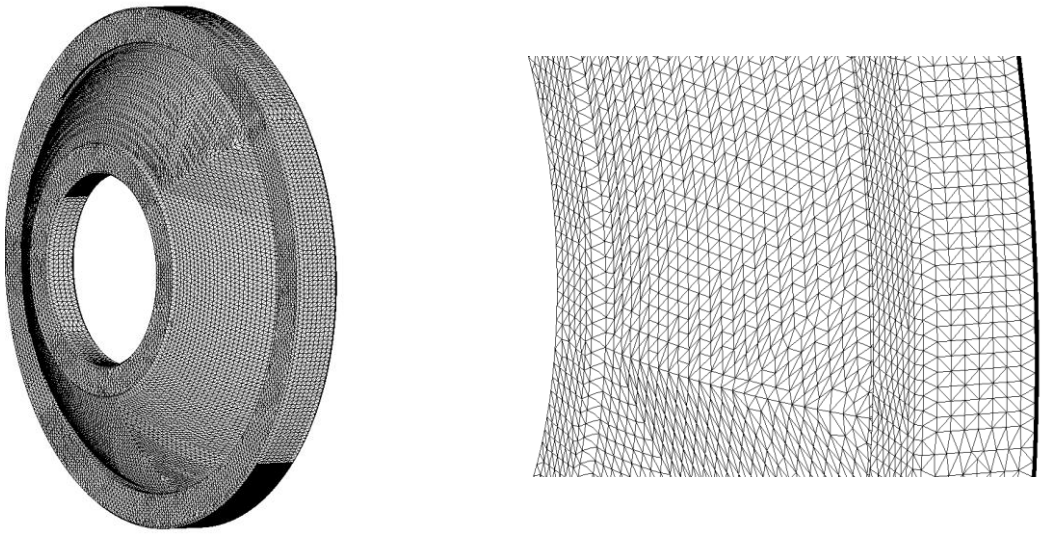
2.6 Расчет механической прочности изолятора

Механическая прочность изолятора рассчитывалась на максимальное рабочее давление в 20 избыточных атмосфер по причине, связанной с предельным максимальным давлением элементов газовой системы ускорителя.

Расчет проводился в программе SolidWorks Simulation [110] методом конечных элементов. Для проведения корректного анализа конструкции требуется ряд исходных данных, в качестве которых выступают: 3D модель анализируемой

детали; материал, из которого она изготовлена; действующие механические нагрузки (давление); поверхности, по которым ограничено движение всей модели.

В случае расчета механических нагрузок на изолятор необходимо оценить воздействие давления рабочего газа на всю внутреннюю поверхность изолятора. При проведении анализа и построения численной модели действия механической нагрузки следует обратить особое внимание на сетку конечных элементов модели, корректное задание направления, величины нагрузки и поверхностей сопряжения детали с другими элементами конструкции. После проведения численного моделирования в элементах сетки, наложенной на 3 D модель детали отображаются результаты механических напряжений, деформаций и перемещений элементов детали под действием приложенной нагрузки. Точность результата расчетов напрямую зависит от параметров и размера сетки конечных элементов. Построение сетки конечных элементов велось посредством предопределенного разбиения, учитывающего степень кривизны поверхности. Размеры элементов лежали в диапазоне от 0,1 мм до 2 мм. Пример построения сетки конечных элементов на изоляторе представлен на рисунке 34.



а б

Рисунок 34 – Сетка конечных элементов. а – сетка наложена на 3D модель изолятора, б – увеличенная секция изолятора с наложенной сеткой.

Так как от качества сетки конечных элементов зависит точность получаемых расчетов необходимо проводить диагностику качества сетки. SolidWorks Simulation позволяет провести диагностику качества построения сетки. На рисунке 35 приведена эпюра качества построения сетки, где за основу взята пропорция кромок элементов.

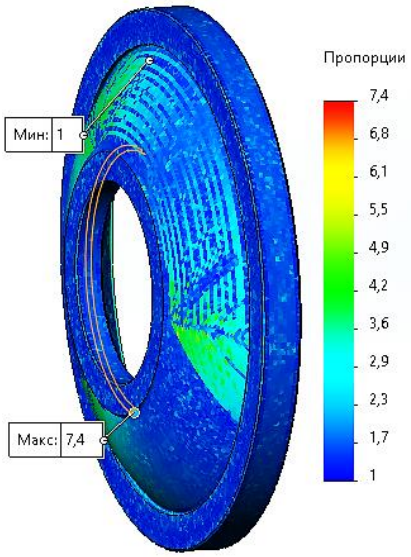


Рисунок 35 – Эпюра качества сетки конечных элементов по пропорции сторон элементов

Эпюра качества сетки конечных элементов на основе коэффициента Якобиана с использованием 16 точек внутри каждого элемента приведена на рисунке 36.

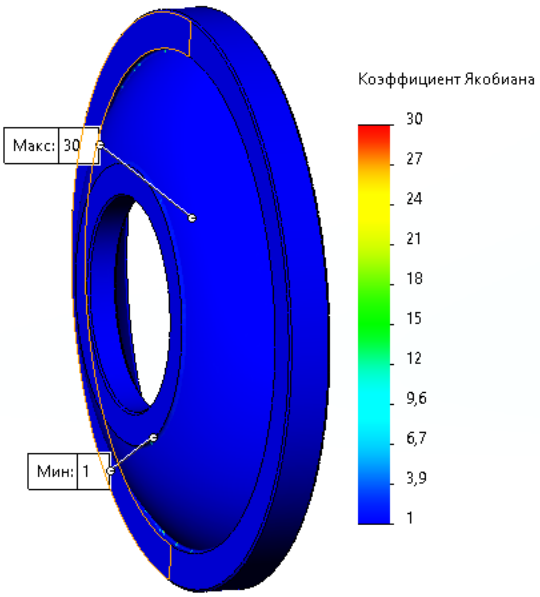
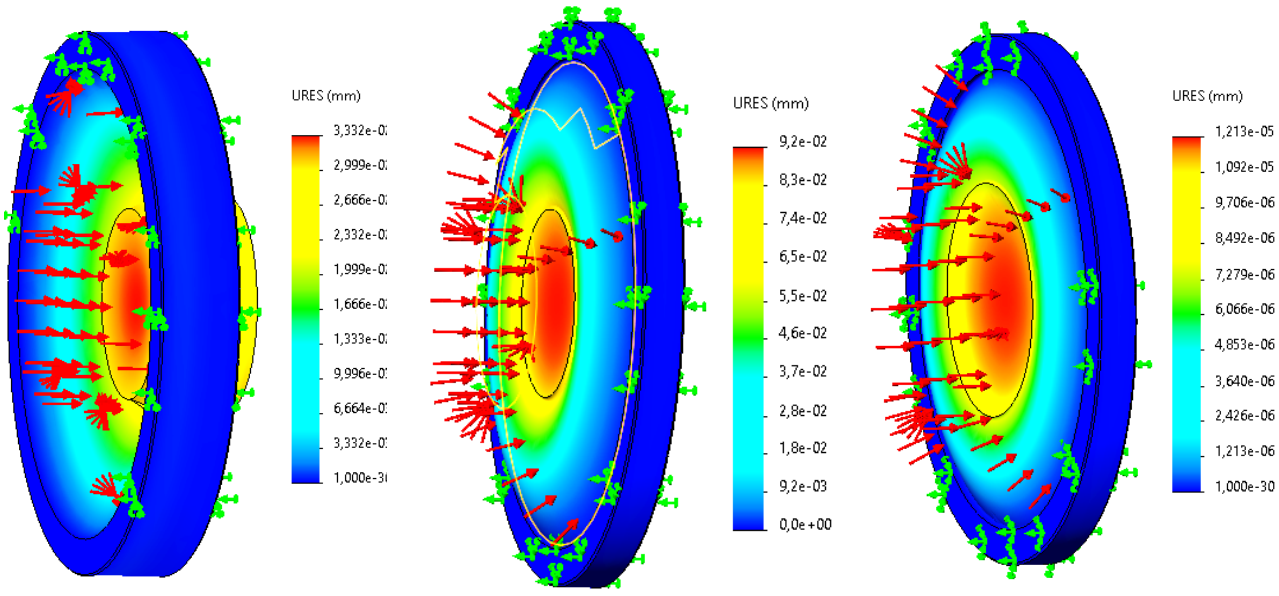


Рисунок 36 – Эпюра качества сетки на основе коэффициента Якобиана

Анализируя эпюры на рисунках 35 и 36, можно сделать вывод о качестве сетки конечных элементов достаточном для проведения расчетов деформаций изолятора. Ячейки сетки, где пропорция или коэффициент имеют значительную величину находятся на участках без резких перепадов размеров или острых кромок, то есть в местах с однородной сеткой, и, вероятно, носят единичный характер, поэтому ими можно пренебречь. Коэффициент запаса прочности, показывающий во сколько раз напряжения на детали меньше разрушающих во всех точках изолятора больше единицы. Подводя промежуточный итог моделирования, можно сделать вывод о способности изолятора выдержать давление в избыточных 20 атмосфер.

Дальнейший расчет велся с целью оценки прогиба изолятора под максимальным приложенным давлением газа внутри разрядника. Результаты расчетов представлены на рисунке 37.



а б в

Рисунок 37 – Максимальный прогиб основного изолятора разрядника. а – базовая версия изолятора, б – промежуточная версия, в – низкоиндуктивная версия изолятора.

Обзор эпюр прогиба трех различных моделей изолятора показывает, что максимальный прогиб ни в одном из случаев не превышает сотых долей миллиметра.

Измерения прогиба изоляторов под нагрузкой и индуктивности изготовленных изоляторов подтвердили теоретические расчеты. В качестве изолятора разрядника выбран вариант, показанный на рисунке 37 в, максимальный прогиб изолятора данной формы при давлении в 20 избыточных атмосфер не превышает 0,3 мм, что вносит незначительную погрешность в междуэлектродном зазоре. Куполообразная форма помимо высокой прочности и увеличения длины пробега по поверхности изолятора способствует конструктивной защите от запыления поверхности изолятора продуктами эрозии после искрового пробоя по причине увеличение тангенциальной составляющей угла падения проводящих частиц к поверхности.

Итоговая форма изолятора с центральным отверстием равным 98 мм при воздействии давления в 20 избыточных атмосфер прогибается не более чем 0,3 мм. Толщина изолятора в зоне основной части разрядника составляет 14 мм, при этом габаритная толщина изолятора составляет 45 мм. Расчетная индуктивность участка изолятора при этом является довольно незначительной величиной и не превышает 5 нГн.

2.7 Схемотехническое исполнение экспериментального стенда для параллельной коммутации серийных разрядников серии РО-43

Исследование разброса времени срабатывания друг относительно друга разрядников со сверхсжатым газом проводилось на том же стенде, что и исследования по основному коммутатору двойной формирующей линии.

В качестве разрядников со сверхсжатым газом использовались разрядники-обострители с внутренним давлением ~ 70 атм. и напряжением срабатывания 160 кВ серии РО-43 производства Рязанского предприятия завода АО «Плазма». Разрядники подключались к выходу формирующей линии в различных конфигурациях как через высоковольтные кабели, так и непосредственно к выходу формирующей линии. На рисунке 38 подключение осуществлено через два высоковольтных кабеля КВИ-120 длиной 10 м. К концам кабелей подключались

ячейки с разрядниками-обострителями, после которых снова следовали два участка кабеля длиной также по 10 м. На концах этих участков устанавливалась согласованная активная нагрузка. Длина участков кабелей выбиралась такой, чтобы их электрическая длина была больше, чем длительность импульса, формируемого ДФЛ. Время пробега волны по участкам кабелей длиной 10 метров составляет 50 нс.

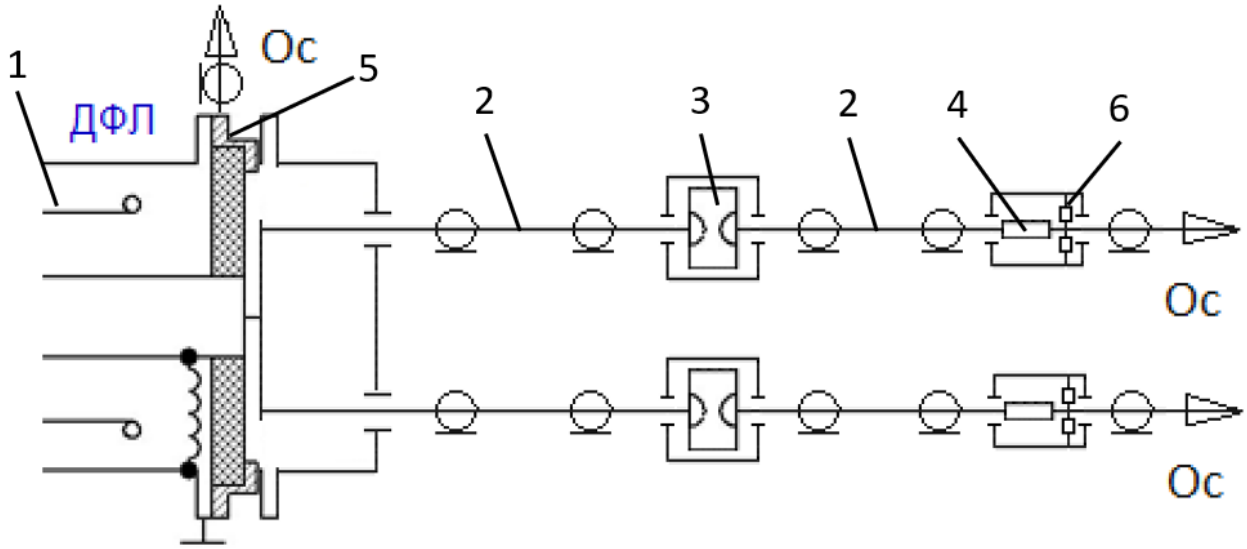


Рисунок 38 – Схема лабораторной установки: 1 – двойная формирующая линия; 2 – кабельные линии; 3 – разрядник РО-43; 4 – резистивная нагрузка; 5 – пояс Роговского, 6 – токовый шунт.

После согласованной резистивной нагрузки установлен токовый шунт (рис. 39), представляющий из себя 30 радиально распаянных постоянных непроволочных резисторов с объёмным проводящим слоем номинальной мощностью 0,25 Вт и сопротивлением одного резистора равным 3 Ом. Время разброса срабатывания друхэлектродных разрядников со сверхсжатым газом определялось по осциллограммам, снятым с токовых шунтов. Сигнал с токового шунта выводится через коаксиальный радиочастотный герметичный приборный разъем СРГ-50 и далее по кабелю РК 50-7-12 длиной 12,5 м уходит в осциллограф. Для подсоединения высоковольтных кабелей использовались специально спроектированные высоковольтные кабельные вводы (рис. 40), позволяющие

производить подключение и использовать высоковольтные импульсные кабели КВИ-120 с паспортной длительностью импульса не короче 20 мкс для передачи сверхоротких импульсов длительностью 40 нс без пробития кабеля в длительном режиме. В случае непосредственного подключения разрядников к формирующей линии первые два кабеля не использовались.



Рисунок 39 – Токовый шунт.

При помощи осциллографирования волны на выходе ДФЛ и импульса тока на нагрузке определялось время срабатывания каждого двухэлектродного разрядника и разброс срабатывания друг относительно друга.



Рисунок 40 – Высоковольтный кабельный ввод.

2.8 Выводы по главе

Для расчетов электрических параметров и измерения коммутационных характеристик разрядника применялось стандартное программное диагностическое и измерительное оборудование. Калибровка электротехнических

датчиков показала их корректную работу и отображение коротких по времени импульсов напряжения и тока (с длительностью фронта нарастания от 2 нс). Корректность работы измерительного оборудования так же подтверждается пренебрежимо малым разбросом значений, измеренных различными датчиками (в том числе резистивным коллектором тока) при их параллельной работе. Точность измерения полного тока разряда и тока нагрузки, а также напряжения отображается с погрешностью не хуже 10%.

Для исследований, в качестве испытательного стенда использовался ускоритель заряженных частиц, использующий генератор с накопителем энергии на основе коаксиальной двойной формирующей линии. Импеданс линии 10 Ом с сопротивлением коммутируемого плеча 4.45 Ом; максимальное рабочее напряжение до 160 кВ; максимальный коммутируемый ток в разряднике до 35 кА; длительность импульса 40 нс.

Используемое оборудование позволяет проводить исследования разрядника со сжатым газом при различных параметрах установки: широкий диапазон напряжений от 40 до 200 кВ; различные газы и газовые смеси при давлениях от атмосферного до 20 атм.; диапазон междуэлектродных зазоров от 1 до 10 мм.

В качестве основного коммутатора для проведения исследований выбран трехэлектродный разрядник со сжатым газом, с диаметром основных электродов разрядника 232 мм при диаметре корпуса разрядника 264 мм. Это соотношение обеспечивает индуктивность участка разрядного контура на участке расположения электродов на уровне 3 нГн без учета индуктивности искровых каналов.

Выбран материал для изготовления основного изолятора, по совокупности физико-механических свойств и гидрофобности в качестве материала изолятора выбран блочный акриловый полимер марки ТОСН.

Оптимальная форма изолятора с центральным отверстием равным 98 мм при воздействии давления в 2000 кПа прогибается не более чем 0,3 мм. Толщина изолятора в зоне разделения жидкости которой заполнена формирующая линия и газового объема разрядника составляет 14 мм, при этом габаритная толщина

изолятора составляет 45 мм. Расчетная индуктивность участка изолятора составляет не более 5 нГн.

Удалось добится общей индуктивности разрядника с изолятором, но без учета искрового зазора ~ 12 нГн.

Спроектированы и изготовлены кабельные высоковольтные вводы для подсоединения высоковольтных импульсных кабелей КВИ-120, при их использовании для передачи коротких импульсов напряжения длительностью от 40 нс.

ГЛАВА 3. КОММУТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОГО РАЗРЯДНИКА СО СЖАТЫМ ГАЗОМ ПРИ КОММУТАЦИИ НИЗКОИМПЕДАНСНОЙ ФОРМИРУЮЩЕЙ ЛИНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 160 КВ

Перспективный ускоритель легких ионов для реализации ядерно-физических технологий основан на объединении нескольких формирующих линий в один ускорительный комплекс с суммированием энергии с каждой линии в линейном трансформаторе и выводе энергии в нагрузку.

Разрядник низкоимпедансной формирующей линии входящей в состав ускорительного комплекса должен обладать малым временным джиттером срабатывания (порядка нескольких наносекунд), обладать высоким ресурсом работы (до 10^6 импульсов без дополнительной настройки и замены эродировавших деталей), коммутировать токи в несколько десятков килоампер с энергией в несколько сот джоулей.

Для реализации столь нетривиальной задачи возникла необходимость проведения комплексных исследований коммутационного узла формирующей линии. Анализ литературы показывает присутствие исследований для каждой отдельно стоящей проблемы, но отсутствие комплексного исследования.

В главе представлены исследования зависимости сочетания параметров многоканальности коммутации, разброса срабатывания и крутизны фронта нарастания тока от сорта газа, наполняющего разрядник, а также от расположения и формы искажающего электрода.

Исследования проводились на мощном импульсном ускорителе, в основе которого лежит низкоимпедансная двойная формирующая линия с рабочим напряжением 160 кВ. Подробно схема ускорителя и его параметры описаны во второй главе. Газовый разрядник настраивался на срабатывание при достижении уровня ≈ 0,9 от максимального напряжения зарядного генератора. Скорость нарастания тока в искровом зазоре определялось как интервал между точками, соответствующими значениям 0.1 - 0.9 от максимального значения тока. Максимальная же скорость нарастания тока определялась по уровням от 0,1 до 0,5

от максимального значения. Эти величины использовались причине того, что при токе от 0 до 10% от его максимальной амплитуды в разряде происходят переходные процессы формирования устойчивого искрового канала и скорость его нарастания достаточно мала. Затем до уровня 50% от максимальной амплитуды тока происходит экспоненциальный рост тока. После значения 50% от максимальной амплитуды тока на процесс начинают влиять параметры внешней электрической цепи и скорость нарастания тока падает [113].

3.1 Обоснование выбора рабочей атмосферы высоковольтного разрядника со сжатым газом

Проведя литературный обзор по газам и газовым смесям, используемым в высоковольтных газовых разрядниках в качестве рабочей газовой среды исследуемого разрядника. Были выбраны наиболее распространенные газы и газовые смеси, используемые в газовых коммутаторах. Ниже приведено обоснование выбора того или иного сорта газа для проведения исследований коммутационных характеристик высоковольтного трехэлектродного разрядника.

Элегаз (SF_6):

Электроотрицательный газ, довольно широко распространенный при использовании в качестве рабочей среды газоразрядных приборов. Во-первых, элегаз обладает высокой электрической прочностью, которая в 2,5-3 раза выше электрической прочности воздуха при атмосферном давлении и при увеличении давления сопоставима с трансформаторным маслом и твердыми диэлектриками выигрывая у них способностью к восстановлению электрической прочности продолжительное время. Электроотрицательность элегаза приводит к тому, что он «связывает» свободные электроны и снижает количество носителей заряда в промежутке, блокируя тем самым искровой пробой ухудшая стабильность поджига. Элегаз обладает весьма высокими теплопроводными свойствами и теплоемкостью, что способствует отведению тепла от электрической искры. Также молекулы элегаза, которые распадаются на серу и фтор в процессе воздействия

искры полностью рекомбинируют за короткое время, восстанавливая исходную электрическую прочность. Однако в процессе воздействия электрической дуги могут образовываться токсичные соединения фторидов, химическая агрессивность которых существенно уменьшает ресурс работы электродов. Существенным недостатком является высокая стоимость элегаза и трудности, возникающие при его покупке [114, 115]. Несмотря на недостатки элегаза широкое распространение его в различных газоразрядных устройствах и неоспоримые достоинства в области высокой электрической прочности позволяющие минимизировать индуктивность разрядного контура за счет сокращения межэлектродного расстояния дают основания выбрать его в качестве одного из исследуемых в разряднике газов.

Азот:

Электроотрицательный газ, обладает сочетанием относительно высокой электрической прочности 3 кВ/мм (выше многих газов, к примеру Гелия) и хорошей стабильностью времени запаздывания пробоя по причине быстрого формирования искрового канала. Малый джиттер запаздывания пробоя критически важен для синхронной работы нескольких разрядников. Азот хорошо изучен, описан в литературе и в отличии от воздуха не содержит кислорода. Отсутствие кислорода благоприятно сказывается на отсутствие окисления электродов и уменьшению их эрозии. Также, например в отличие от элегаза в процессе воздействия искры не образуется токсичных соединений или соединений, выделяющих сажу. Азот также обладает хорошей теплоемкостью и деионизацией в следствие подвижности молекул, это позволяет искровому промежутку, наполненному азотом быстро восстановить электрическую прочность [116]. По показателям экономической эффективности азот также является весьма привлекательным газом, по причине доступности и невысокой стоимости.

Гелий:

Инертный газ. По причине планируемой работы разрядника в частотном режиме было решено исследовать гелий, как газ способный обеспечивать высокую частоту следования импульсов с минимальным временем коммутации Гелий обладаем весьма высокой теплопроводностью и способностью ионов гелия к

подвижности, тем самым способствуя высокой скорости восстановления электрической прочности искрового промежутка после предыдущего пробоя, высокая подвижность и ионизация гелия также позволяем формировать импульсы с весьма короткими фронтами[117, 118]. Недостаток пробивной прочности гелия относительно других газов, в первую очередь азота и SF_6 компенсируется увеличением давления газа в разряднике. На выбор гелия в качестве одного из исследуемых газов повлияла также его безопасность при использовании по сравнению с водородом, применяющемся при частотной работе разрядников, и его химическая инертность, которая благоприятно влияет на деградацию электродов и изоляции, а это в свою очередь на увеличение ресурса и стабильность коммутационных характеристик. К существенным недостаткам гелия стоит отнести существенное время запаздывания [40].

Аргон:

Инертный газ, по сравнению с азотом и элегазом обладает относительно низкой электрической прочностью и по причине отсутствия образования электроотрицательных ионов снижается коэффициент рекомбинации заряженных частиц в междуэлектродном промежутке (медленная деионизация искрового зазора). Аргон имеет минимальный потенциал зажигания и высокую стабильность искры. Коммутация в аргоне имеет относительно хорошую стабильность по времени с небольшим разбросом. По причине инертности газа, не происходит существенного окисления поверхности электродов в отличие от азота или кислорода, работа выхода электронов с поверхности электрода при этом не изменяется, что дает стабильность напряжения пробоя и, потенциально высокий ресурс электродов [49, 113].

90%N2+10%SF6:

Газовая смесь, сочетающая в себе достоинства чистого азота, такие как быстрота срабатывания и стабильность с высокой электрической прочностью и дугогасящими свойствами элегаза [76].

Добавка всего 10% элегаза в азот увеличивает электрическую прочность последнего до уровня 60÷70 % от прочности чистого элегаза. Небольшая добавка

элегаза связывает случайно возникшие при более низком напряжении начальные электроны, не давая возможности развитию пробоя при напряжениях ниже статического напряжения пробоя, это приводит к стабильности разброса напряжения срабатывания. Добавка элегаза также важна с точки зрения его деионизирующих качеств. Способность захватывать оставшиеся электроны позволяет за короткое время погасить искровой разряд и восстановить электрическую прочность промежутка, азот же обладает свойством быстрого отведения тепла из зоны искрового пробоя. В процессе пробоя также не происходит образования большого количества токсичных фторидов как при использовании чистого элегаза, что благоприятно сказывается на уменьшении коррозии электродов и продлевает их ресурс. Небольшое количество элегаза в смеси, являющегося весьма дорогим газом положительно сказывается на экономической эффективности.

Добавление к азоту элегаза в процентном соотношении, превышающем 10% не приводит к существенному улучшению характеристик. Электрическая прочность газа возрастает менее существенно, при этом происходит рост времени запаздывания пробоя и возрастает нестабильность срабатывания. Сильная электроотрицательность элегаза начинает сильно сказываться на развитие стримеров из начальных электронов по причине их захвата и связывания, в итоге увеличивается задержка срабатывания. Также большое количество тяжелых молекул элегаза мешает развитию лавин и расширению искровых каналов, затягивая фронт коммутируемого импульса, что для наносекундных импульсов является весьма критичным условием. Немаловажным фактором является увеличение образования токсичных фторидов и сернистых соединений, которые разрушают поверхность электродов и снижают их ресурс [113,119,120].

80%N2+10%SF6+10%Ar:

В источнике [74] описана добавка к смеси азота и элегаза небольшой процентной доли аргона призванной стабилизировать напряжение пробоя и обеспечить максимальную крутизну спада напряжения.

Снижение и стабилизация напряжения пробоя: Потенциал ионизации аргона ниже, чем у азота или воздуха. Добавление аргона позволяет добиться более легкого и быстрого зажигания электрического разряда при строго заданном напряжении, это его свойство призвано компенсировать присутствие элегаза в смеси. Аргон является химически инертным газом и не оказывает разрушающего действия на поверхность электродов.

3.2 Влияние газовой атмосферы на многоканальность коммутации трехэлектродного разрядника

Из литературного обзора выяснено, что индуктивность разрядного контура напрямую влияет на коммутационные характеристики разрядника, в частности на многоканальность срабатывания разрядника и ветвистую структуру искры. В свою очередь подсветка искрового зазора ультрафиолетом весьма благоприятно влияет на количество искровых каналов, уменьшение разброса срабатывания и задержку срабатывания при коммутации искровых газовых разрядников. Подсветку ультрафиолетом возможно организовать несколькими способами, но самым эффективным и нетрудоемким с точки зрения изначальной настройки, подстройки во время работы и долговечности (ресурса) является непосредственная подсветка от искрового пробоя предразрядника включенного последовательно с основным разрядником в разрядную цепь. Условием корректной работы ультрафиолетовой подсветки в данном случае является нахождение основного искрового зазора в прямой видимости зазора предразрядника (рис. 41).

Из литературы (глава 1) известно, что ресурс разрядника в значительной степени сокращается в следствие оседания проводящего слоя на поверхность изолятора. Проводящий слой образуется продуктами эрозии металлических электродов в процессе воздействия на них искровых каналов и их соединениями с рабочим газом. Эрозия также влияет на изменение расстояния между электродами и изменение работы выхода с поверхности электродов.

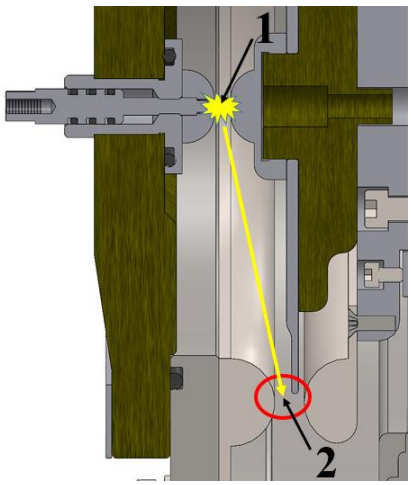
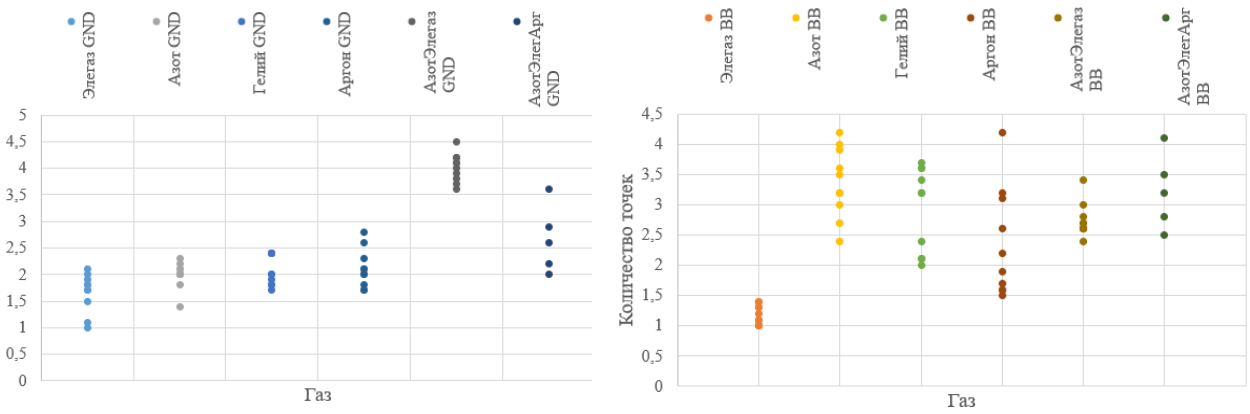


Рисунок 41 – Подсветка ультрафиолетом от срабатывания зазора предразрядника 1 на зазор основного разрядника 2.

Для косвенной оценки эрозионной стойкости электродов в среде различных газов была проведена серия экспериментов при напряжении пробоя равном ≈ 70 кВ при одинаковых параметрах междуэлектродного расстояния в основном искровом зазоре и зазоре предразрядника равном 2 мм. Выбор амплитуды напряжения пробоя сделан по причине невозможности достижения большей амплитуды для некоторых исследуемых газов (аргон и гелий) так как газовая система экспериментальной установки не позволяет работать с давлением выше 20 атмосфер. Таким образом все исследования проводились на максимальном напряжении пробоя, которое способна обеспечить конструкция разрядника при использовании гелия в качестве рабочего газа. Количество эрозионных отпечатков, оставленных искрой на поверхности электродов, оценивалось визуально, подсчетом после серии из 10 срабатываний с последующим усреднением 10 серий. По причине различной электрической прочности газов давление рабочей газовой среды отличалось для каждого газа. Давление для элегаза (SF_6) равнялось 0,7 атм, для азота (N_2) 3 атм, для гелия (He) 20 атм, для аргона (Ar) 17 атм, для смеси $N_2$90%+$SF_6$10% 2 атм и для смеси $N_2$80%+$SF_6$10%+Ar10% 2,5 атм. Результаты проведенных исследований по многоканальности разряда для заземленного и высоковольтного электродов сведены в графики, представленные на рисунке 42.



а б

Рисунок 42 – Графики зависимости среднего числа искровых каналов в зависимости от газовой среды. а – заземленный электрод, б – высоковольтный электрод.

Из графиков хорошо видно, что чистые газы: аргон, гелий, азот и элегаз имеют наименьшее количество искровых каналов на заземленный электрод, в среднем 2 канала за срабатывание, однако в отличии от элегаза остальные газы имеют в среднем 3 – 3,5 искровых канала за одно срабатывание на высоковольтный электрод, но при этом разброс от серии к серии составляет ≈ 50%. Смеси газов имеют примерно одинаковое среднее значение количества искровых каналов на высоковольтный электрод, но смесь $N_2$80%+$SF_6$10%+Ar10% имеет больший разброс от серии к серии. Большее же количество каналов на заземленный электрод имеет смесь $N_2$90%+$SF_6$10% порядка 4 каналов за одно срабатывание. Следует также обратить внимание, что смесь $N_2$90%+$SF_6$10% имеет наименьший разброс количества искровых каналов на оба электрода. Наихудший результат наблюдался для чистого элегаза, где в большом количестве срабатываний многоканальность отсутствовала и наблюдалась наибольшая эрозия поверхности электродов. На поверхности электродов предразрядника видимой эрозии после воздействия искры не наблюдалось (рис. 43), что говорит о низкой эрозии поверхности электрода и высоком ресурсе узла предразрядника.

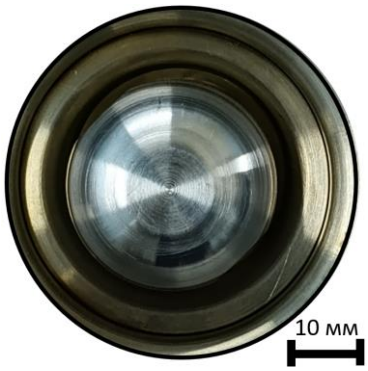


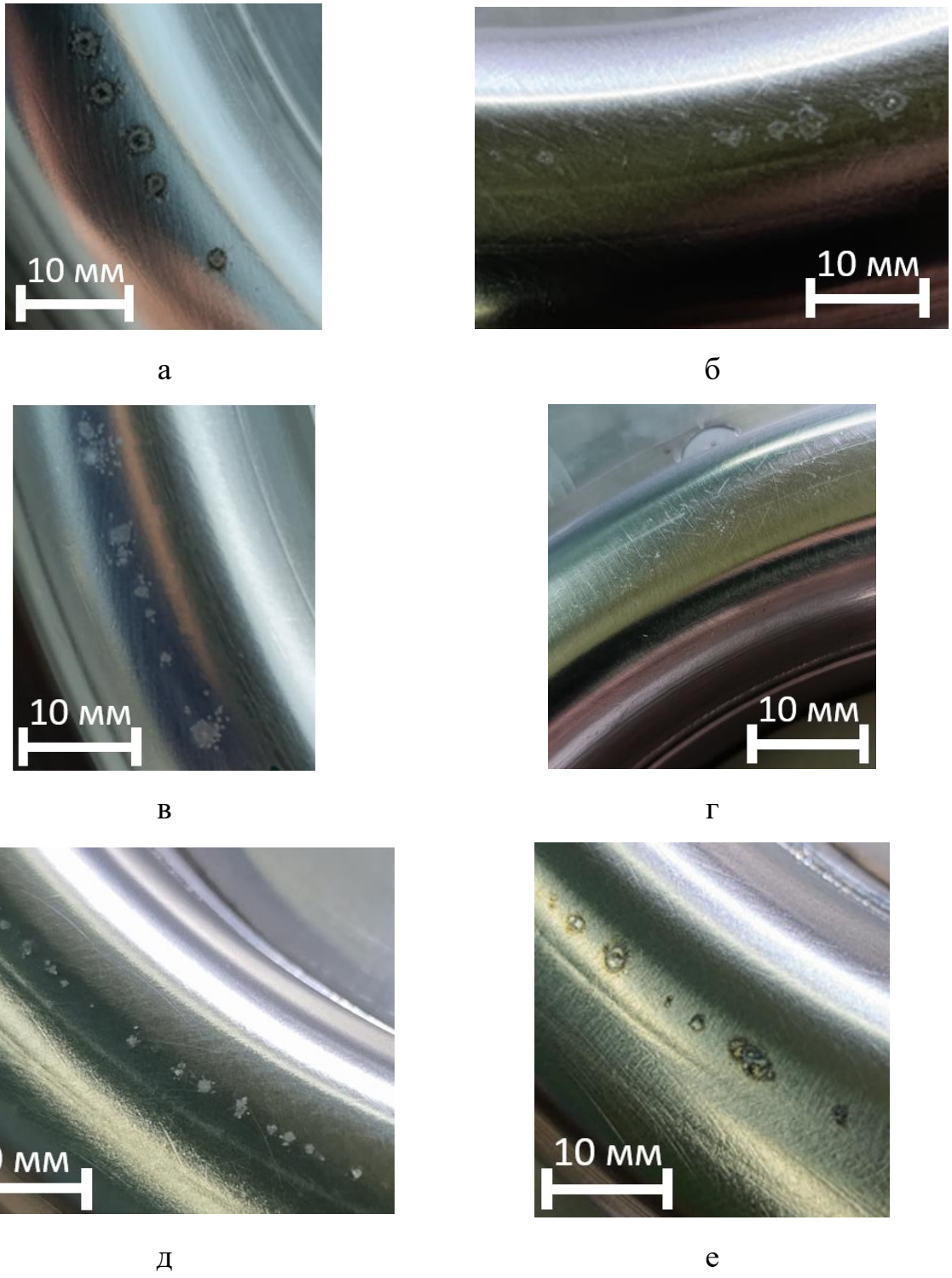
Рисунок 43 – Поверхность электрода предразрядника без видимых следов эрозии на поверхности после 10^3 срабатываний.

Характер отпечатков, оставленных после воздействия искрового канала на поверхность электродов, отличается и зависит от сорта газа. На рисунке 44 представлены отпечатки на поверхности электродов.

Эрозия электродов оценивалась по размерам отпечатков и, косвенно, стойкости к последующему удалению полированием. Наибольшая эрозия электродов наблюдалась для чистого элегаза и для азота с добавлением 10% элегаза и 10% аргона. Умеренная эрозия наблюдалась при работе в среде чистых газов: азота и гелия. Наименьшая эрозия в среде чистого аргона или смеси азота с добавлением 10% элегаза. Стоит отметить, что после работы в среде чистого аргона отпечатки, оставленные искровым каналом на поверхности электродов слабо различимы, и на первый взгляд отсутствуют полностью, но при увеличении становятся различимы. Наибольшая ветвистость искровых каналов для чистых газов наблюдалась по убыванию: аргон, гелий, элегаз, азот. В смесях газов ветвистость искровых каналов присутствует в незначительном количестве для смеси азота с элегазом и практически полностью не наблюдается в смеси 80%N_2+10%SF_6+10%Ar.

Проведя анализ эрозионных отпечатков, оставленных искровыми каналами для двух смесей, представленных на рисунке 44 д. и е. говорит о том, что в смеси $N_2$90%+$SF_6$10% искровые каналы имеют более ветвистую структуру, а их размер одинаковый. В то время как в смеси $N_2$80%+$SF_6$10%+Ar10% отпечатки имеют

большой разброс по размеру, что может быть следствием большого разброса количества каналов от срабатывания к срабатыванию.



а б

в г

д е

Рисунок 44 – Характерные следы на поверхности электродов после воздействия искрового канала в среде: а – элегаз, б – азот, в – гелий, г – аргон, д – 90%N_2+10%SF_6, е – 80%N_2+10%SF_6+10%Ar.

3.3 Коммутационные характеристики трехэлектродного разрядника в зависимости от газовой атмосферы

Пробивное напряжение, величина и длительность фронта нарастания коммутируемого тока, а также времена задержки и разброса коммутации оценивались по осциллограммам. Характерная осциллограмма напряжения на линии, тока с шунта предразрядника и тока разрядника приведена на рисунке 45.

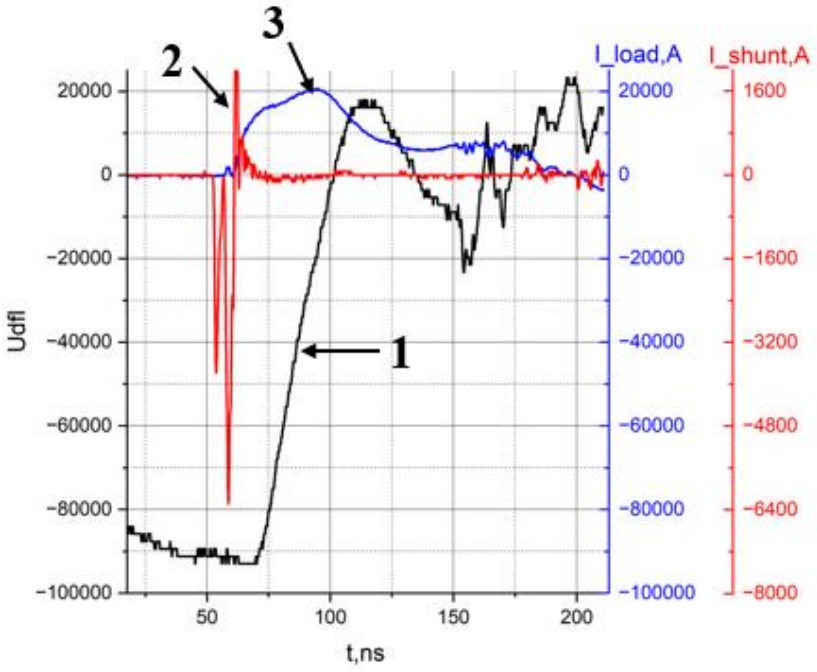


Рисунок 45 – Характерная осциллограмма напряжения на ДФЛ (1), тока в предразряднике с измерительного шунта (2) и тока в разряднике с пояса Роговского (3).

Для оценки коммутационных характеристик были измерены средние значения разброса срабатывания по напряжению, скорости нарастания тока и разброс его максимального значения. Все данные представлены таблице 2.

Из приведенных в таблице 2 данных хорошо видно, что чистый элегаз обладает наименьшим разбросом по напряжению срабатывания, однако нужно принимать во внимание тот факт, что при длительной работе разрядника эта характеристика может существенно измениться в силу плохих свойств газа в части жестчения. Наилучшими скоростями нарастания тока при примерно одинаковом разбросе по напряжению обладают смеси газов, однако в смеси

N280%+SF610%+Ar10% этот показатель выше в 1,7 раза. Это объясняется добавкой аргона, который приводит к более высокой степени ионизации газа и как следствие, более высокой скорости снижения сопротивления канала.

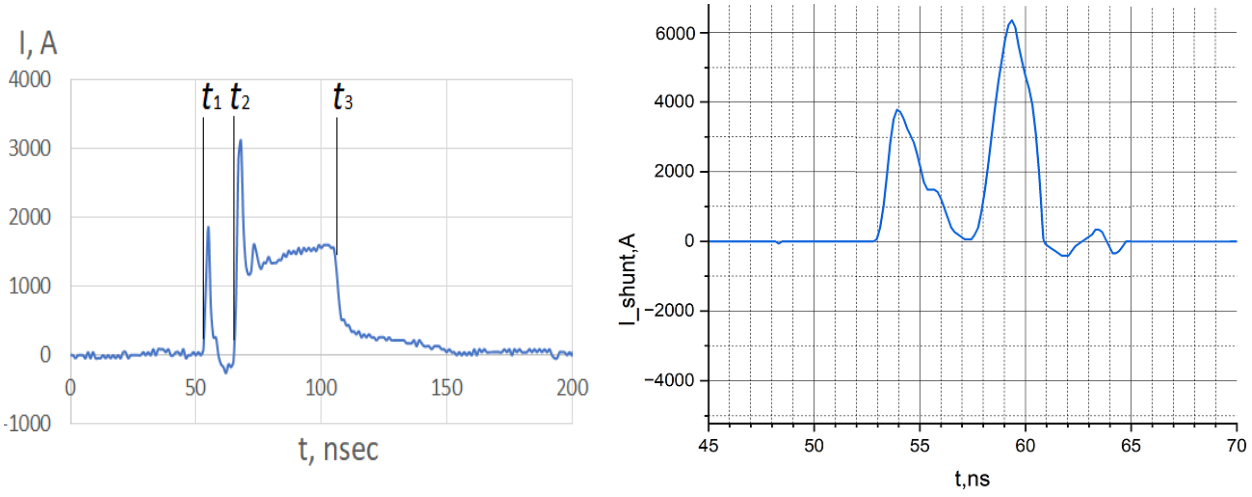
Таблица 2 – Коммутационные характеристики разрядника для разных газов при среднем напряжении срабатывания 70кВ.

Газ/смесь	Скорость нарастания тока на уровне 0,1-0,9	Скорость нарастания тока на уровне 0,1-0,5	Рзброс срабатывания по напряжению, кВ
He	3,2*10^11 А/с	4,6*10^11 А/с	34
Ar	4,2*10^11 А/с	5,3*10^11 А/с	16
N2	5,3*10^11 А/с	6,5*10^11 А/с	17
SF6	6,5*10^11 А/с	7,6*10^11 А/с	10
$N_2$90%+$SF_6$10%	6,35*10^11 А/с	8*10^11 А/с	18
$N_2$80%+$SF_6$10%+Ar10%	8,3*10^11 А/с	13*10^11 А/с	17

Осциллограмма тока с шунта предразрядника при длительном развитии разрядных процессов на основных промежутках разрядника показана на рисунке 46 а. Осциллограмма дает наглядное представление о процессах, происходящих в разрядном контуре, осциллограмма тока на предразряднике с временами развития пробоя в рабочем режиме показана на рисунке 46 б.

Глядя на осциллограмму (рис 46 а.) процессы происходящие в предразряднике и в основном междуэлектродном промежутке можно описать следующим образом. В момент t1 происходит пробой предразрядника. Выброс тока в этот момент связан с перезарядом емкостей между центральным электродом и основными электродами. Далее следует пауза, в течение которой происходят разрядные процессы и формируются искровые каналы в междуэлектродном промежутке между третьим и высоковольтным электродами. После того, как

сформируется разряд в этом промежутке (момент t2), появляется выброс тока, связанный с перезарядом емкостей и повышением потенциала центрального электрода до потенциала высоковольтного электрода. Далее, пока не сформировался разряд в зазоре между третьим и заземленным электродами, ток ДФЛ начинает протекать через закороченный искровой зазор между третьим и высоковольтным электродами и, через низкоиндуктивный композитный резистор R токового шунта мощностью рассеяния равной 5 Вт и согласованным сопротивлением 50 Ом. По мере расширения и разветвления искровых каналов, их сопротивление снижается и ток через резистор нарастает. В момент времени t3 происходит пробой зазора между третьим и заземленным электродами и ток, протекающий через резистор, начинает стремительно снижаться по мере формирования и расширения искровых каналов, пока не упадет до нуля. Теперь весь ток линии «протекает» через основные зазоры разрядника. Более подробно с принципом работы разрядника можно в п 2.4 глава 2.



а б

Рисунок 46 – Осциллограмма тока предразрядника: а – длительное развитие разрядных процессов, б – рабочий режим предразрядника.

При проведении экспериментальных исследований регистрировали время t2 – t1 = T1 – это время между срабатыванием предразрядника и срабатыванием зазора между третьим и высоковольтным электродами, а также время t3 – t1 = T2 – это время между срабатыванием предразрядника и полным срабатыванием основных

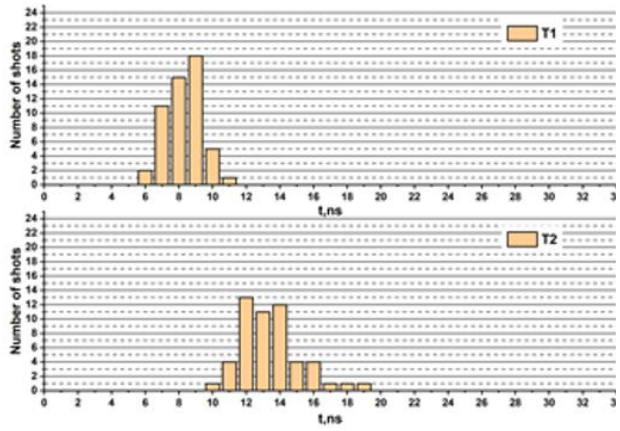
зазоров. Время Т1 демонстрирует динамику взаимосвязи срабатывания предразрядника и основного разрядника, в то время как Т2 показывает полное время коммутации всего разрядника.

На рисунке 47 показаны гистограммы времени срабатывания разрядника. Вертикальная ось и высота столбика гистограммы отображают количество срабатываний разрядника, для которых время срабатывания имело одно и то же значение, горизонтальная ось отображает время в наносекундах.

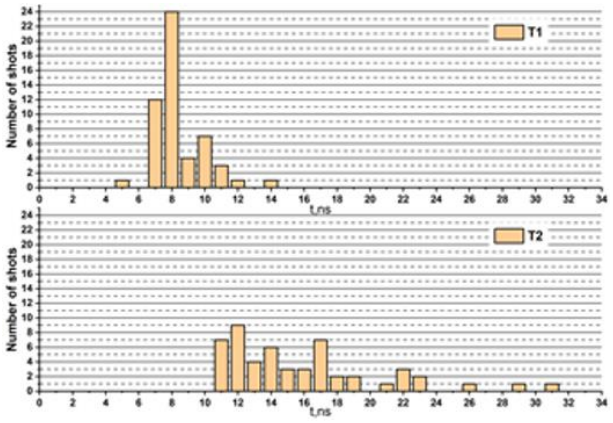
Результаты измерения времени срабатывания (рис. 47) показывают, что состав газов влияет также на время срабатывания разрядника и разброс этого времени. Видно, что разброс время срабатывания в среднем составляет от 10 до 30 наносекунд. При этом, разница между временами Т1 и Т2, не превышающая в среднем 10 нс, дает представление о времени нарастания напряжения на зазоре, которая составляет около 10^{13} В/с. Известно, что для разрядников, работающих без предварительной ионизации в междуэлектродном промежутке задержка времени срабатывания зависит от скорости нарастания напряжения [121, 122]. После того, как напряжение на электродах превысило напряжение статического пробоя, эта задержка может составлять несколько десятков наносекунд. Добиться задержки в пределах 10 нс позволяет высокая скорость нарастания напряжения на электродах более 10^{13} В/с [114]. Таким образом, полученные данные укладываются в общие теоретические представления.

На гистограммах видно, что время срабатывания основного зазора (Т1) лежит в диапазоне от 3 до 9 нс для смеси $N_2$80%+$SF_6$10%+Ar10% при этом среднее его значение составляет 5,86 нс при среднеквадратичном отклонении 3,7 нс. Для смеси $N_2$90%+$SF_6$10% время коммутации основного зазора лежит в пределах от 2 до 6 нс со средним значением 4,12 нс и среднеквадратичным отклонением 1,3 нс. При этом полное среднее время срабатывания разрядника (Т2) от момента начала формирования канала в предразряднике и до завершения формирования каналов в основном зазоре разрядника для смеси $N_2$80%+$SF_6$10%+Ar10% составляет 12 нс со среднеквадратичным разбросом 2 нс и $N_2$90%+$SF_6$10% и 11 нс со среднеквадратичным разбросом 1,5 нс соответственно. Увеличение разброса

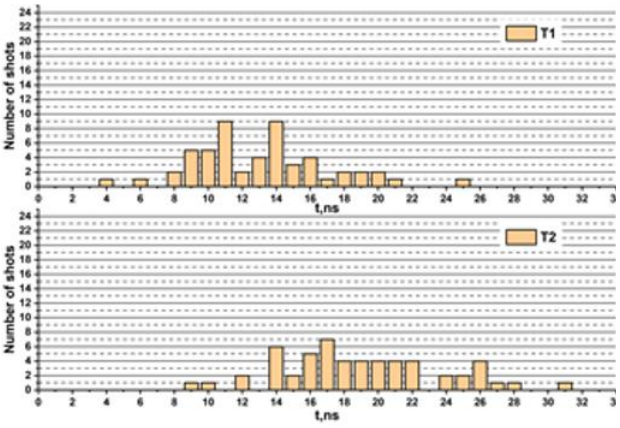
срабатывания в обоих случая обуславливается нестабильностью срабатывания предразрядника.



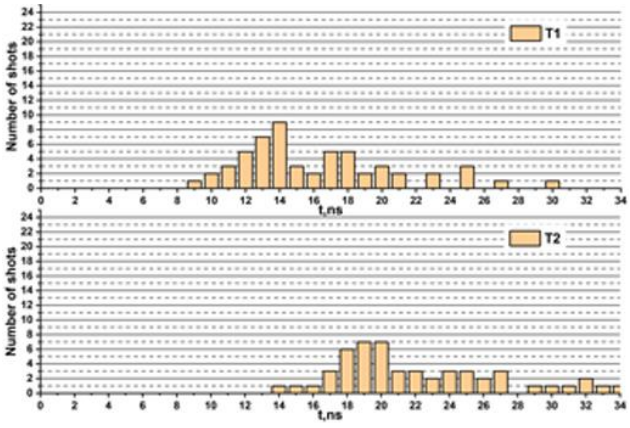
а



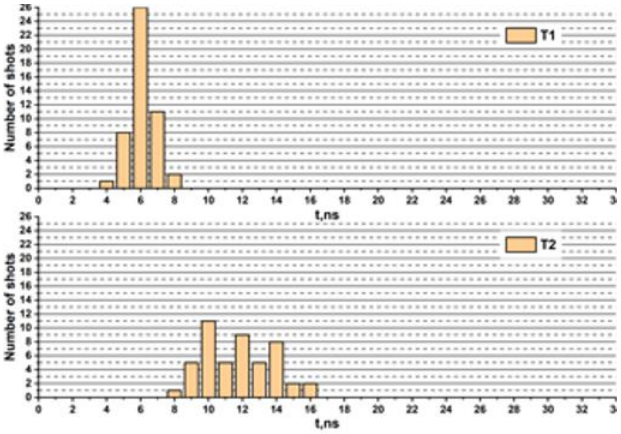
б



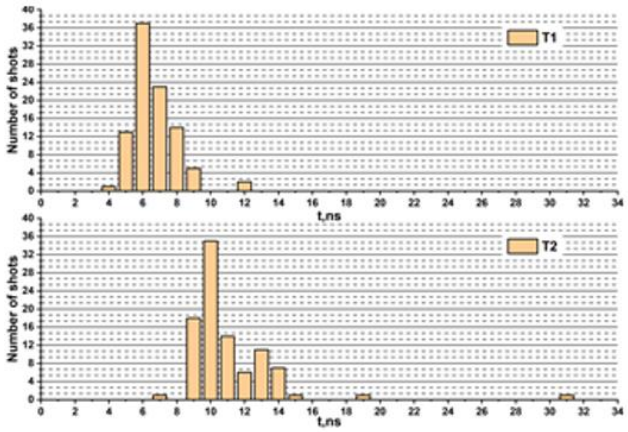
в



г



д



е

Рисунок 47 – Время τ1 и τ2 срабатывания разрядника: а – элегаз, б – азот, в – гелий, г – аргон, д – 90%N_2+10%SF_6, е – 80%N_2+10%SF_6+10%Ar.

По совокупности параметров, таких как стабильность срабатывания основного зазора, количество каналов в основном зазоре на оба электрода и их малый разброс от импульса к импульсу все последующие эксперименты по оптимизации параметров среднего электрода при большем напряжении пробоя проводились при использовании смеси N290%+SF610%.

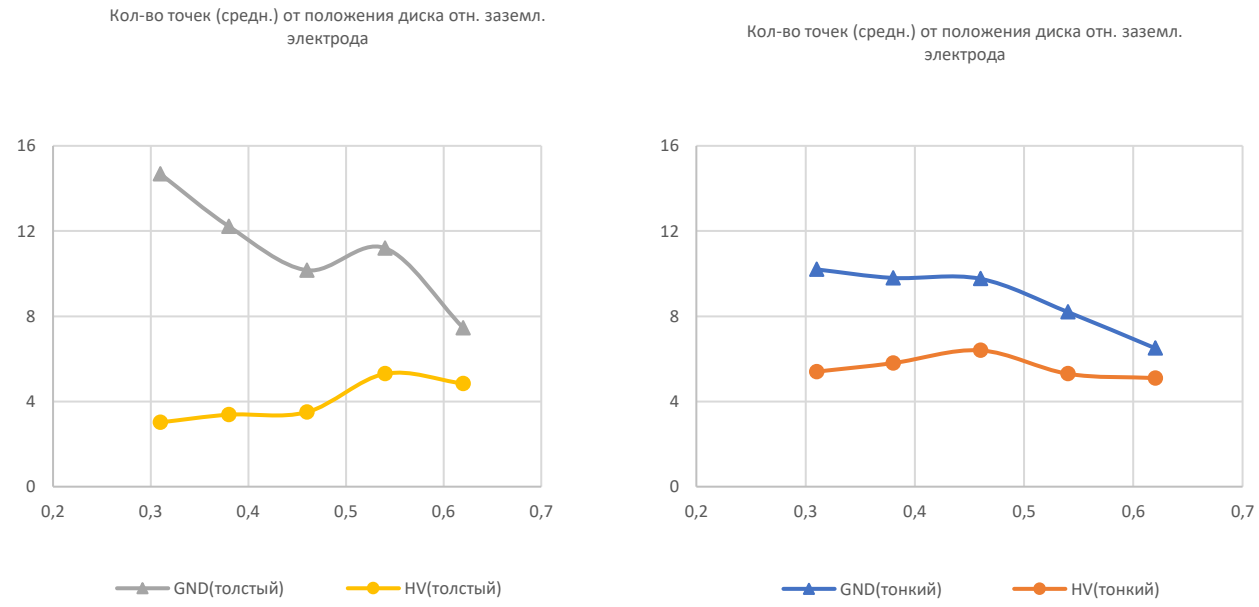
3.4 Коммутационные характеристики трехэлектродного разрядника в зависимости от положения среднего электрода

Эксперименты по влиянию положения среднего электрода, выполненного в форме диска, в межэлектродном зазоре, относительно заземленного основного тороидально электрода выполнялись при среднем напряжении коммутации 120 кВ. Зазор между основными электродами не изменялся и составлял 8,5 мм. В эксперименте использовались два средних электрода с разным радиусом закругления кромки 1 мм и 0.5 мм. Оценка количества каналов производилась подсчетом числа эрозионных пятен на основных электродах после серии из 10 срабатываний разрядника. Для каждого положения среднего электрода было выполнено по 10 серий. Положение среднего электрода изменялось вставкой медных дистанционирующих колец между средним электродом и изолятором, на котором он закреплен. Дистанционирующие кольца изготавливались разной толщины с шагом равным 0,5 мм.

На рисунке 48 представлены графики зависимостей количества искровых каналов от положения среднего электрода относительно заземленного электрода для дискового среднего электрода с кромками 1 мм и 0,5 мм.

Из графиков видно, что диск с кромкой 0,5 мм обладает более стабильным количеством искровых каналов, а их количество слабо зависит от положения среднего электрода относительно заземленного. Помимо этого, при обоих радиусах закругления в зазоре между средним и высоковольтным электродами всегда наблюдается меньшее количество каналов чем в зазоре между средним и

заземленным электродами. Это можно объяснить тем, что замыкание зазора между средним и высоковольтным электродами инициируется изменением потенциала среднего электрода, при этом изменение напряжения на зазоре между средним электродом и высоковольтным меняется от двух третьих (при соотношении емкостей 40 пФ к 18 пФ) до полного напряжения заряда формующей линии со скоростью, определяемой скоростью перезаряда емкости С2 на емкость С3 (рис. 49 б.) и составляющей в среднем 10^{13} В/с.



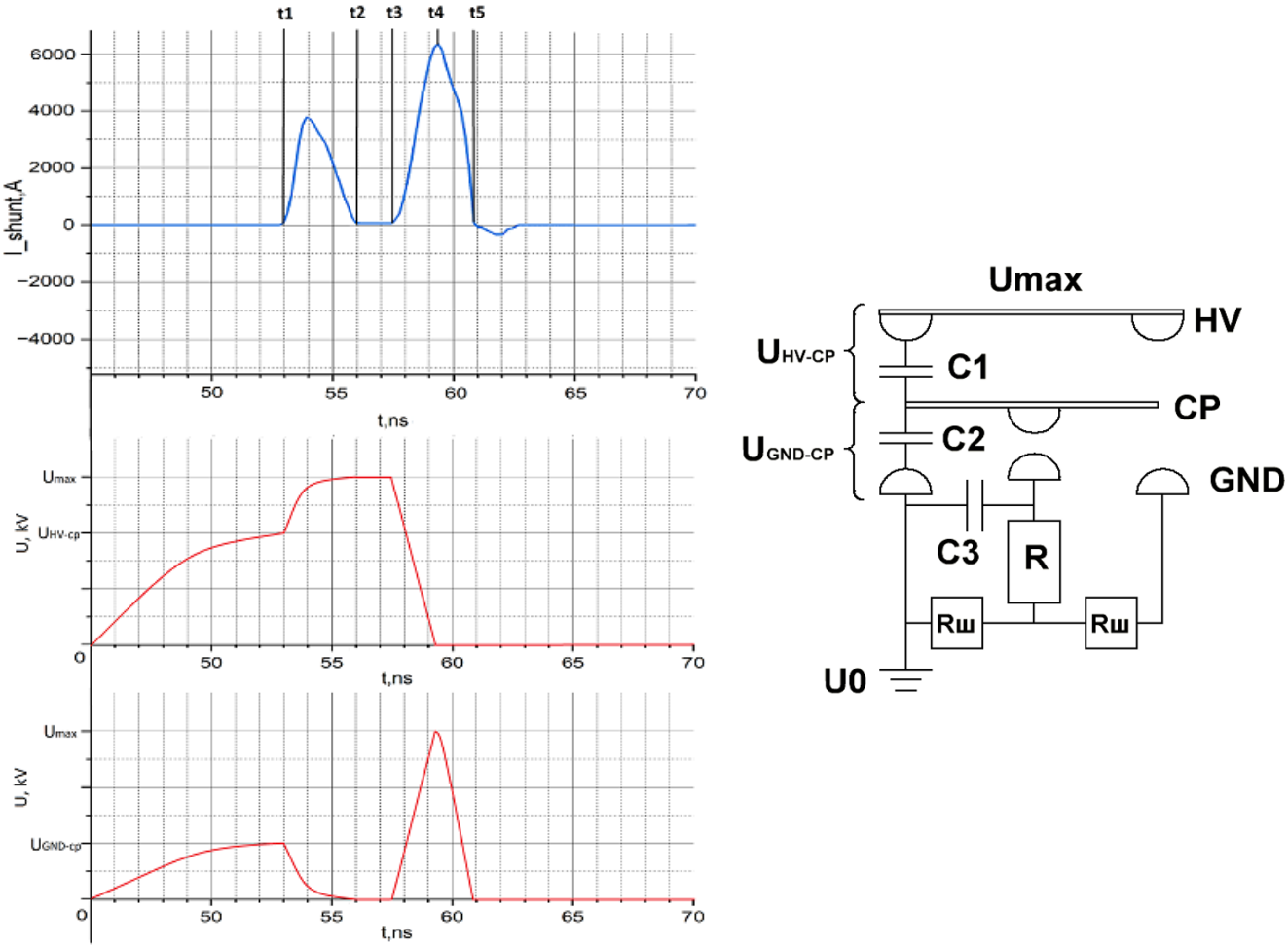
а б

Рисунок 48 – Количество каналов в зависимости от положения среднего электрода относительно заземленного. а – радиус кромки 1 мм, б – 0,5 мм.

При коммутации нижнего зазора изменение потенциала среднего электрода меняется с 0 В до напряжения заряда формующей линии со скоростью, определяемой в основном временем формирования искровых канала в зазоре между средним и высоковольтным электродами и составляющей $5{,}6 \cdot 10^{13}$ В/с. Также следует отметить, что при приближении среднего электрода к высоковольтному количество искровых каналов практически одинаково для обоих радиусов закругления кромки среднего электрода. Однако при использовании среднего электрода с радиусом скругления 1 мм количество искровых каналов в зазоре между средним и заземленным электродами не превышает 5, в то время как

количество искровых каналов при использовании среднего электрода в форме диска с кромкой радиусом 0,5 мм в том же зазоре не менее 6 для всех положений среднего электрода.

Изменение потенциала в основных междуэлектродных промежутках трехэлектродного разрядника можно описать с помощью графиков и схемы, представленных на рисунке 49.



а б

Рисунок 49 – Распределение напряжения в междуэлектродных промежутках. а – графики изменения потенциала на основных зазорах разрядника, б – схема распределения емкостей и потенциала в разряднике.

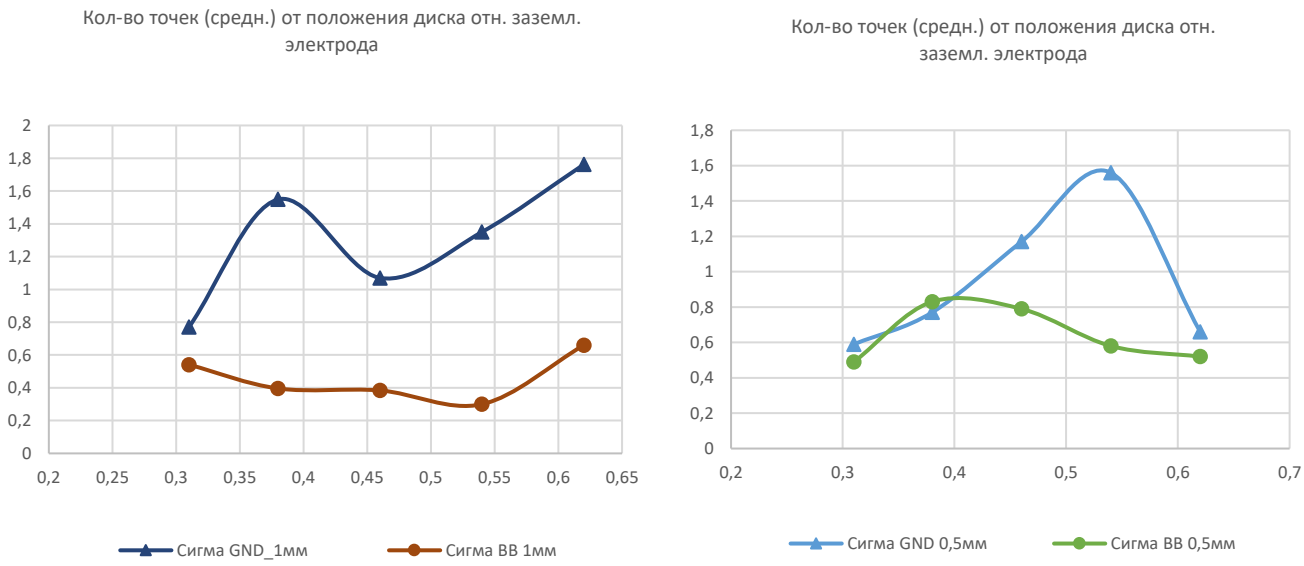
От начала зарядки лини до момента времени t1 происходит плавное нарастание потенциала в междуэлектродных зазорах в пропорции, определенной эквипотенциалью, на которой находится средний электрод. В случае исследуемого разрядника к моменту времени t1 потенциал нарастает приблизительно до уровня

1/3 U_{max} в зазоре между заземленным электродом и средним электродом и 2/3 U_{max} в зазоре между высоковольтным и средним электродами. U_{max} при этом равняется величине напряжения, до которого зарядилась ДФЛ до начала включения разрядника. В момент времени t1 происходит пробой предразрядника и потенциал в зазоре между заземленным и средним электродами стремится к нулю за время t2-t3, потенциал в зазоре между высоковольтным электродом и средним электродом за это время, наоборот, становится максимальным. В период времени t2-t3 происходит развитие разрядных процессов, в междуэлектродных промежутках нарабатываются начальные электроны перерастая в лавины и т.д. Напряженность поля резко повышается, вплоть до возникновения коронного разряда на кромке среднего электрода. Потенциалы междуэлектродных промежутков при этом не изменяются. В момент времени t3 происходит завершение формирования минимум одного искрового канала в промежутке между средним и высоковольтным электродами и происходит пробой (замыкание промежутка), при этом потенциал этого промежутка стремится к нулю до времени t4. В этот же временной интервал (t3-t4) потенциал в промежутке между средним и заземленным электродами возрастает до максимального значения, происходит развитие разрядных процессов. Далее, в момент времени t4 происходит пробой промежутка между заземленным и средним электродами и потенциал этого промежутка падает до нуля за время t4-t5. В промежутке между высоковольтным и средним электродами продолжается развитие искровых каналов и потенциал там не изменяется.

Графики среднеквадратичного отклонения количества искровых каналов для электродов с кромками, имеющими различный радиус скругления представлены на рисунке 50. Из графиков видно, что разброс количества искровых каналов во всех случаях менее одного искрового канала на срабатывание.

На рисунке 51 представлены графики соотношения количества искровых каналов, образованных в промежутке между заземленным и средним электродами к количеству каналов в промежутке между высоковольтным и средним электродами для средних электродов с радиусами скругления кромки равными соответственно 1 мм и 0,5 мм.

Из графиков соотношения искровых каналов видно, что в случае использования среднего электрода с радиусом округления кромки 0,5 мм соотношение искровых каналов уменьшается при смещении его в сторону высоковольтного электрода, а количество искровых каналов в верхнем и нижнем зазоре становиться практически одинаково.



а б

Рисунок 50 – Среднеквадратичное отклонение количества каналов в зависимости от положения среднего электрода относительно заземленного. а – радиус кромки 1 мм, б – 0,5 мм.

Из приведенных данных можно сделать заключение, что диск с радиусом скругления кромки равным 0,5 мм обеспечивает многоканальный пробой с высокой стабильностью по количеству искровых каналов от срабатывания к срабатыванию при различном положении диска в междуэлектродном зазоре, а также стабильным соотношением количества искровых каналов, возникающих в искровых зазорах между основными электродами. Стоит отметить, что при соотношении зазоров равном ~ 0.5 количество искровых каналов в каждом зазоре превышает значение 7.

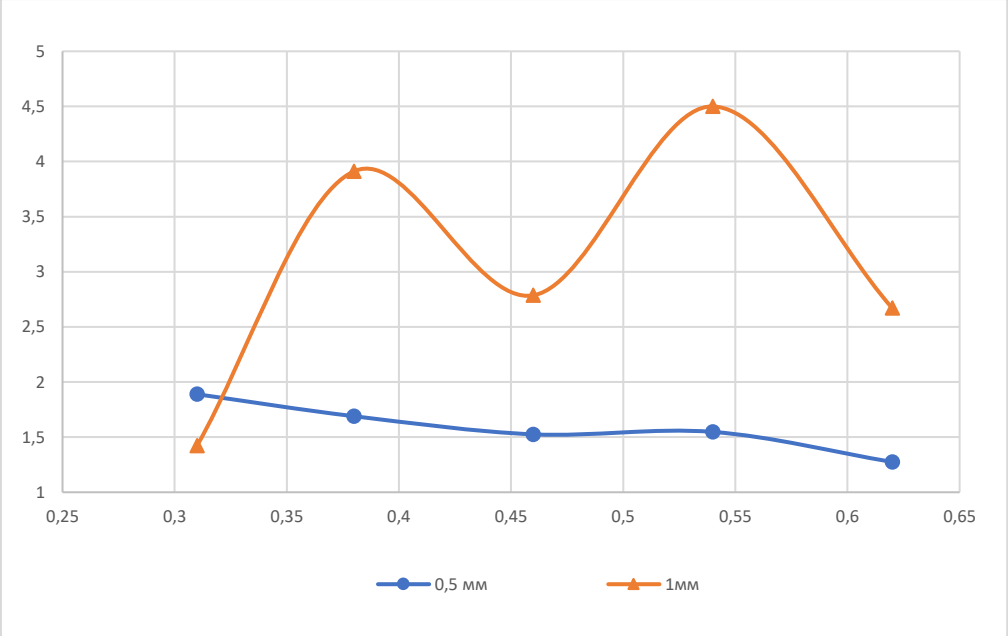


Рисунок 51 – Соотношение количества искровых каналов, образованных в промежутке между заземленным и средним электродами к количеству каналов в промежутке между высоковольтным и средним электродами для кромки среднего электрода с радиусом 0,5 мм и 1 мм.

3.5 Выводы по главе

Проведен анализ газов и газовых смесей, применяемых в качестве рабочей среды высоковольтных многоканальных разрядников, определены наиболее подходящие для исследования газы: элегаз, азот, гелий, аргон, 90%N_2+10%SF_6 и 80%N_2+10%SF_6+10%Ar.

Малый разброс количества искровых каналов от срабатывания к срабатыванию позволяют получить чистый элегаз, а также смеси 90%N_2+10%$_{SF6}$, 80%N_2+10%SF_6+10%Ar. Однако чистый элегаз существенно уступает другим газам в количестве искровых каналом на одно срабатывание, что приводит к повышенной эрозии электродов. Из смесей 90%N_2+10%SF_6 и 80%N_2+10%SF_6+10%Ar более высокую и стабильную многоканальность показывает смесь 90%N_2+10%SF_6.

Время срабатывания основного зазора для смеси $N_2$90%+$SF_6$10% лежит в пределах от 2 до 6 нс со средним значением 4,12 нс и среднеквадратичным отклонением 1,3 нс. При этом полное среднее время срабатывания разрядника от

момента начала формирования канала в предразряднике и до завершения формирования каналов в основном зазоре разрядника для смесеи $N_2$90%+$SF_6$10% составляет 11 нс со среднеквадратичным разбросом 1,5 нс соответственно.

По совокупности параметров, таких как стабильность срабатывания основного зазора, количество каналов в основном зазоре на оба электрода и их малый разброс от срабатывания к срабатыванию наиболее подходящей средой для исследуемого трехэлектродного разрядника со сжатым газом, используемого для коммутации низкоимпедансной коаксиальной формирующей линии, является смесь, состоящая из азота с добавлением 10% элегаза.

Дисковый средний электрод с кромкой, обладающей радиусом скругления равной 0,5 мм, обладает наименьшим разбросом количества искровых каналов, а их число слабо зависит от положения среднего электрода относительно заземленного.

Средний электрод, выполненный в виде тонкого диска с радиусом скругления кромки равным 0,5 мм, обеспечивает многоканальный пробой с высокой стабильностью числа искровых каналов от включения к включению при различном положении диска в междуэлектродном зазоре, а также стабильное соотношение числа искровых каналов, возникающих в искровых зазорах между основными электродами. При соотношении зазоров между средним электродом с одной стороны и высоковольтным, либо заземленным электродами с другой равном ~ 0.5 количество искровых каналов в каждом зазоре не опускается ниже 7.

ГЛАВА 4. РАЗБРОС ВРЕМЕНИ КОММУТАЦИИ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ДВУХЭЛЕКТРОДНЫХ РАЗРЯДНИКОВ СО СВЕРХСЖАТЫМ ГАЗОМ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИИ

Неуправляемые двухэлектродные разрядники со сверхсжатым газом серии РО-43 представляют собой серийно выпускаемые изделия завода АО «Плазма», г.Рязань. Разрядник наполнен водородом под давлением ≈ 70 атм, имеет металлокерамический отпаянный корпус с изолятором из алюмооксидной керамики и корпусом из немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Изделия предназначены для применения в качестве разрядников-обострителей в рентгеновской аппаратуре, медицине, дефектрскопии металлоконструкций и др. Основные характеристики приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики разрядника РО-43.

Параметр	Значение
Динамическое напряжение пробоя	140÷190 кВ
Импульсный ток	1 кА
Коммутируемая энергия	2 Дж
Габариты, d × h	50 × 80 мм
Ресурс	3×10^6 импульсов

Двухэлектродные разрядники со сверхсжатым газом обеспечивают возможность существенно снизить потери энергии и индуктивность разрядного контура по причине уменьшения габаритных размеров и массы устройства.

Номенклатура серийно выпускаемых газовых разрядников чрезвычайно узка, притом большинство из серийно выпускаемых изделий не обеспечивают достаточный уровень коммутируемой энергии. Последние поколения разрядников АО «Плазма» в отличие от аналогов используют в качестве наполнения водород под сверхвысоким давлением. Это позволяет обеспечить весьма низкий разброс по статическому напряжению срабатывания (в пределах 2%), весьма высокую скорость и частоту коммутации [63, 77, 104]. Таким образом, существует теоретическая возможность использовать эти разрядники при параллельном включении, чтобы разделить между ними токовую нагрузку и увеличить значение

коммутируемой энергии, сохранив достаточный ресурс разрядников-обострителей. В свою очередь это позволит обострить фронт импульса на выходе с двойной формирующей линии до попадания его в диод, используя серийно производимые промышленностью устройства, что позволит снизить конечную себестоимость ускорителя.

В главе представлены экспериментальные данные, показывающие возможность параллельного использования неуправляемых двухэлектродных разрядников со сверхсжатым газом для обострения фронта импульса, генерируемого низкоомной формирующей линией.

4.1 Параллельная коммутация разрядников-обострителей серии РО-43 при соединении с ДФЛ через кабельные линии

Эксперименты по разбросу времени срабатывания двух разрядников-обострителей проводились на специальном стенде. В качестве источника импульса напряжения использовалась двойная формирующая линия (ДФЛ) волновым сопротивлением 10 Ом с длительностью выходного импульса на полувысоте 40 нс. Подробно с параметрами генератора выходного импульса напряжения и его диагностическим оборудованием можно ознакомиться в главе 2. К выходу формирующей линии подключались два высоковольтных импульсных кабеля КВИ-120 длиной 10 м. К концам кабелей подключались ячейки с разрядниками-обострителями, после которых снова следовали два участка кабеля длиной также по 10 м. На концах этих участков устанавливалась согласованная активная нагрузка, представляющая собой ячейку, наполненную трансформаторным маслом внутри которой расположен резистор ТВО-10 с объёмным проводящим слоем, номинальной мощностью 10 Вт и номинальным сопротивлением 50 Ом (рис. 52). Длина участков кабелей выбиралась такой, чтобы их электрическая длина была больше, чем длительность импульса напряжения, формируемого ДФЛ. Время пробега волны по 10-метровым участкам кабелей составляет 50 нс. Это делалось для того, чтобы исключить влияние разрядников друг на друга. При этом падающая

волна на оба разрядника была одинаковой с точки зрения времени прихода к разряднику-обострителю и амплитуде напряжения.

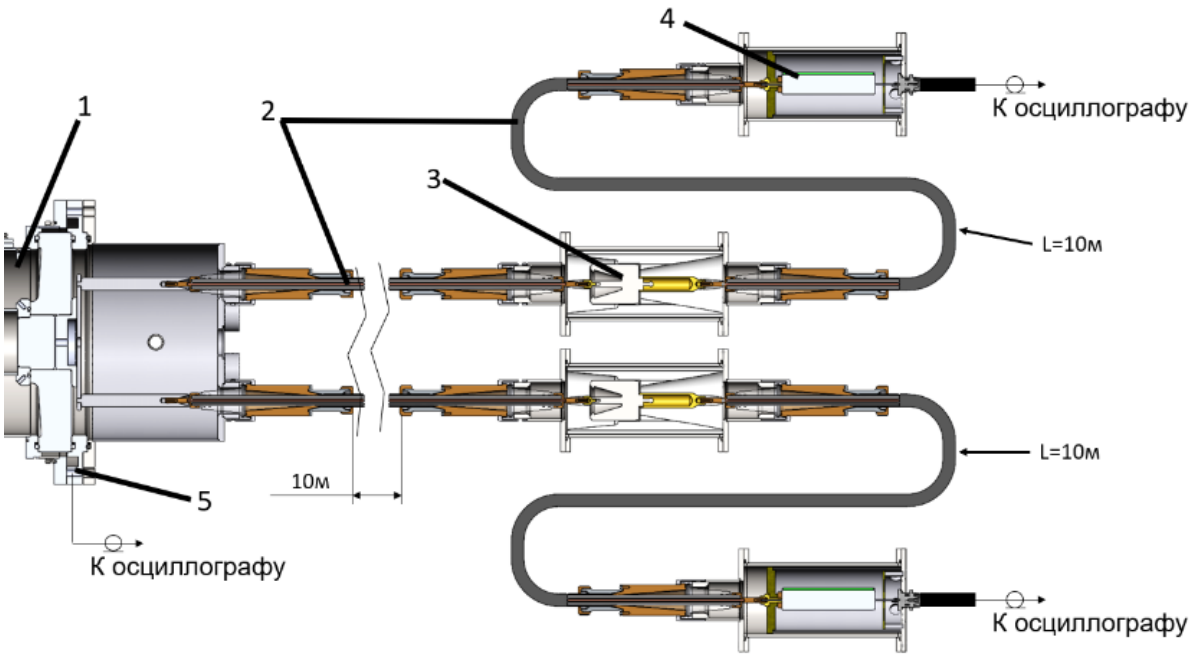


Рисунок 52 – Схема лабораторной установки: 1 – двойная формирующая линия; 2 – кабельные линии; 3 – разрядник РО-43; 4 – резистивная нагрузка; 5 – пояс Роговского.

Сигнал тока снимался после согласованной нагрузки через токовый шунт (рис. 39). При помощи осциллографирования волны на выходе ДФЛ, импульса тока на нагрузке и сигналов с токовых шунтов определялся разброс время срабатывания разрядников друг относительно друга и параметры падающей волны, приходящей на разрядники-обострители.

Характерные осциллограммы токов и напряжения, регистрируемые на выходе формирующей линии и в нагрузке при проведении эксперимента приведены на рисунке 53. Udfl соответствует зарядному напряжению на ДФЛ, Ish1 и Ish2 соответствуют значениям токов, детектируемых токовыми шунтами, установленными после разрядников-обострителей, Irog – ток с пояса Роговского, установленного на выходе с ДФЛ.

Среднее напряжение заряда формирующей линии составляло 140 кВ ± 5%. Напряжение срабатывания разрядников РО-43 составляло 160 кВ ± 2% (данные от

завода изготовителя). Принимая во внимание потери, произошедшие при коммутации линии (на основном разряднике формирующей линии) напряжение падающей волны на выходе ДФЛ составляло ~ 120 кВ. С учетом коэффициента преломления, рассчитанного исходя из волнового сопротивления формирующей линии и подключенных кабельных линий и равного 1,42 напряжение падающей волны в кабелях между выходом формирующей линии и разрядниками-обострителями составляло 170 кВ. Измеренное напряжение срабатывания разрядников достаточно точно совпадает с паспортным значением.

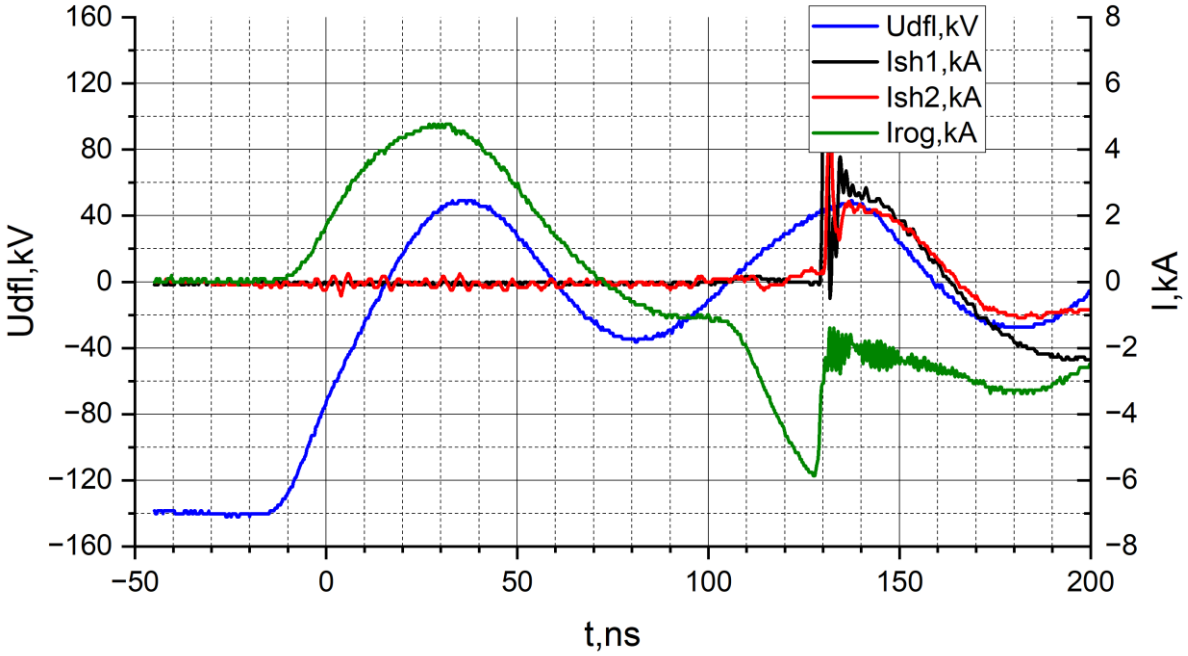


Рисунок 53 – Характерные осциллограммы токов и напряжения на выходе ДФЛ и нагрузке.

Разброс срабатывания разрядников относительно друг друга измерялся по осциллограммам с токовых шунтов в нагрузке. Гистограмма разброса времени срабатывания представлена на рисунке 54.

На гистограмме видно, что разброс срабатывания разрядников относительно друг друга не превышает 2,5 нс в абсолютном значении, при этом среднее значение составляет 1,24 нс со среднеквадратичным отклонением 0,75 нс. Полученные результаты позволяют говорить о том, что использование этих разрядников для параллельного включения возможно, однако следует обеспечить условие, при

котором время пробега волны плюс время, затраченное на формирование газового пробоя в разряднике будет больше времени разброса срабатывания разрядников относительно друг друга.

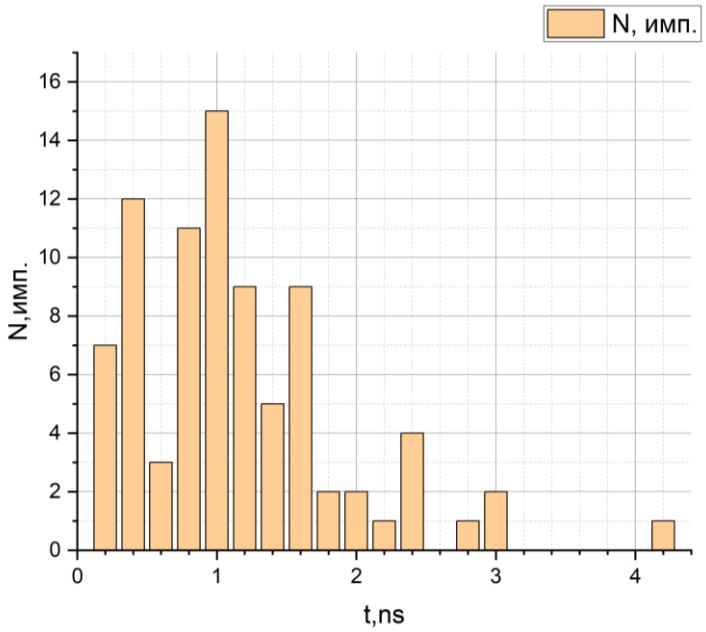


Рисунок 54 – Гистограмма разброса срабатывания разрядников РО-43 относительно друг друга.

4.2 Параллельная коммутация разрядников-обострителей серии РО-43 при обострении импульса напряжения непосредственно на выходе с ДФЛ

Для подтверждения выводов о необходимости обеспечения условия пробега волны не менее времени разброса срабатывания разрядников-обострителей серии РО-43 была проведена серия экспериментов, в которых присоединение этих же разрядников-обострителей происходило непосредственно на выходе двойной формирующей линии (на разветвляющем коллекторе). Схема эксперимента представлена на рисунке 55. К выходу формирующей линии через коллектор, представляющий из себя пластину из немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 5 мм и диаметром 200 мм подключались разрядники-обострители. Объем заполнялся трансформаторным маслом, далее к выходам через кабельные высоковольтные вводы подключались два высоковольтных импульсных

кабеля КВИ-120 длиной 10 м. На концах этих кабелей устанавливалась согласованная активная нагрузка, представляющая собой ячейку, наполненную трансформаторным маслом внутри которой расположен резистор ТВО-10 с объёмным проводящим слоем, номинальной мощностью 10 Вт и номинальным сопротивлением 50 Ом.

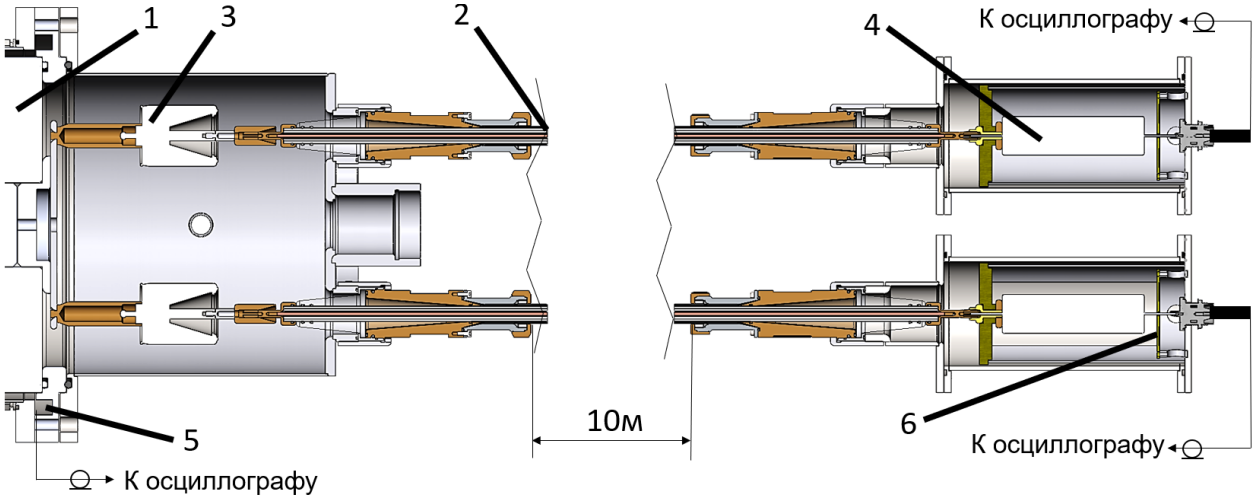
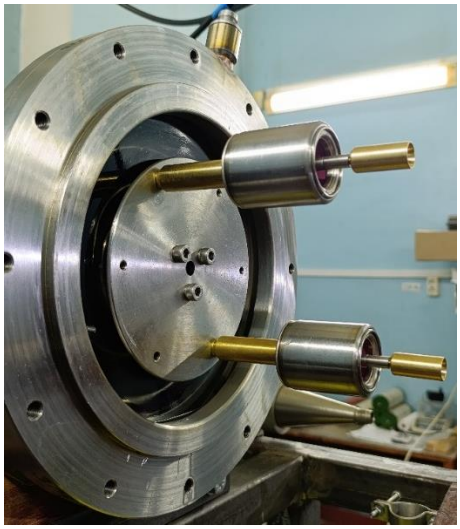


Рисунок 55 – Схема лабораторной установки: 1 – двойная формирующая линия; 2 – кабельная линия; 3 – разрядник РО-43; 4 – резистивная нагрузка; 5 – пояс Роговского; 6 – токовый шунт.

Фотографии расположения разрядников-обострителей серии РО-43 на коллекторе с выхода ДФЛ и корпуса со специальными кабельными вводами для высоковольтных импульсных кабелей КВИ-120, заполняемого трансформаторным маслом, в котором располагаются разрядники-обострители представлены на рисунке 56.

Для выполнения условия, обеспечивающего коммутацию обоих разрядников при разбросе их срабатывания друг относительно друга в 2 нс разрядники-обострители крепились к коллектору диаметром 200 мм диаметрально, на противоположных концах, через дистанционирующие стойки длиной 100 мм, при этом суммарное расстояние между разрядниками составляло ~ 400 мм. В качестве среды, в которой располагались разрядники использовалось трансформаторное масло с диэлектрической проницаемостью 2,2. В этих условиях пробег волны

между разрядниками составлял ~ 2 нс, что удовлетворяло необходимым требованиям по разбросу срабатывания разрядников-обострителей РО-43.



а



б

Рисунок 56 – Фотографии: а – расположения разрядников на коллекторе с выхода ДФЛ; б – корпуса со специальными кабельными вводами для высоковольтных импульсных кабелей КВИ-120.

Характерные осциллограммы токов и напряжения, регистрируемые на выходе формирующей линии и в нагрузке при проведении эксперимента приведены на рисунке 57. Udfl на осциллограмме соответствует зарядному напряжению на ДФЛ, Ish1 и Ish2 представляют собой значения токов, детектируемых токовыми шунтами, установленными после разрядников-обострителей, Irog – ток с пояса Роговского, установленного на выходе с ДФЛ. Подъем тока до срабатывания разрядников обострителей обусловлен током, протекающим через емкость, которая образуется между коллектором, корпусами разрядников-обострителей и токопроводящим корпусом, в котором собрана вся система.

Гистограмма разброса срабатывания разрядников-обострителей относительно друг друга представлена на рисунке 58. Следует отметить, что зарядное напряжение линии для обеспечения срабатывания разрядников составляло 190 кВ, с учетом потерь в разряднике ДФЛ и емкостной нагрузки амплитуда падающей волны составляла ~ 170 кВ, что эквивалентно напряжению,

приходящему на разрядник-обостритель в экспериментах с подключением их через высоковольтные кабели.

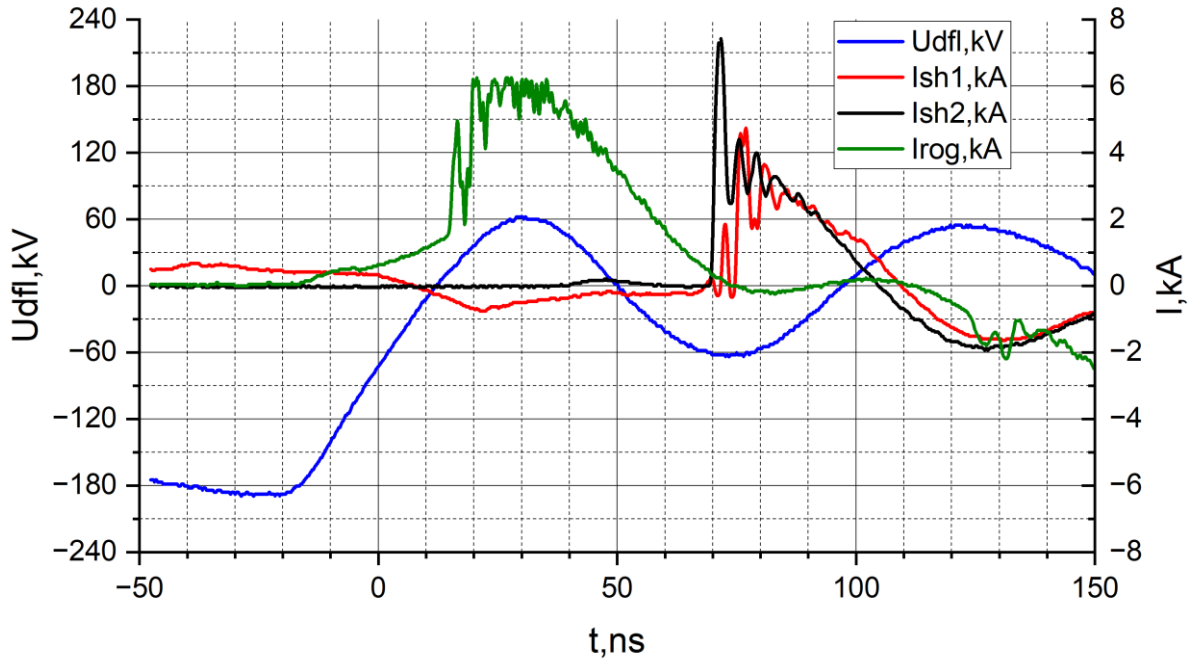


Рисунок 57 – Характерные осциллограммы токов и напряжения на выходе ДФЛ и на нагрузке.

Из гистограммы видно, что абсолютный разброс срабатывания двух разрядников-обострителей серии РО-43 так же, как и в экспериментах с подключением их через высоковольтные импульсные кабели КВИ-120 не превышает 2 нс, при этом среднее значение разброса составляет 1.3 нс со среднеквадратичным отклонением 0,6 нс. Уменьшение абсолютного разброса срабатывания разрядников-обострителей по сравнению с экспериментами из предыдущего параграфа можно объяснить тем, что падающая волна, приходящая на разрядник-обостритель через один из двух на первый взгляд одинаковых участка высоковольтного кабеля оканцованного высоковольтными вводами не полным образом, соответствует волне, приходящей по параллельному кабелю за счет неравномерных потерь в кабеле, высоковольтных вводах и не абсолютной идентичности итоговых волновых сопротивлений. Тем не менее средний разброс и среднеквадратичные отклонения в обоих сериях экспериментов с высокой степенью совпадают и можно сказать, что они практически равны.

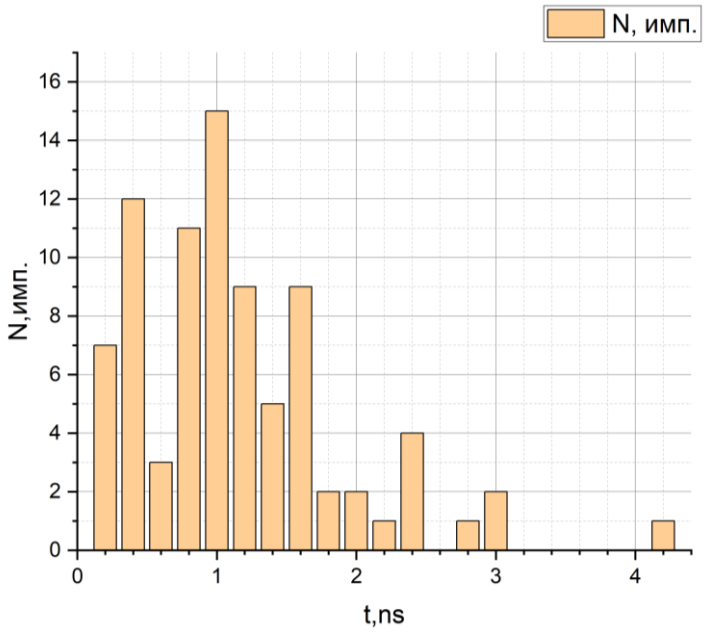


Рисунок 58 – Гистограмма разброса срабатывания разрядников РО-43 относительно друг друга.

Также немаловажным является тот факт, что в процессе проведения вышеописанных серий экспериментов общее число импульсов со средней энергией на уровне не ниже 25 Дж (при максимальной пропускаемой разрядником-обострителем энергии в 1Дж согласно паспортным данным), прошедших через каждый из разрядников превышало значение 10^3, при этом ни один из разрядников не вышел из строя.

Уменьшение джоулевой нагрузки на разрядник, с целью увеличения его ресурса работы или повышения коммутируемой энергии возможно добиться путем увеличения количества параллельно включенных разрядников. Вместе с тем для минимизации массогабаритных параметров выходной части формирующей линии в качестве среды, заполняющей объем, в котором будут находиться разрядники-обострители нужно использовать диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью. Это необходимо для уменьшения расстояния между разрядниками, при сохранении времени пробега волны между ними. Так при использовании глицерина или деионизованной воды (дистиллированная вода) необходимое расстояние между двумя соседними разрядниками составит 100 мм и 70 мм соответственно. Диэлектрики в виде глицерина либо деионизованной воды

выглядят наиболее перспективно еще и с точки зрения использования того же диэлектрика, который используется в качестве основного наполнителя формирующей линии. Дополнительно этот шаг позволит уменьшить габариты за счет уменьшения линейного рамзмера или полностью отказавшись от изолятора разделяющего ДФЛ и объем с коллектором, на котором размещены разрядники-обострители.

Обобщая вышеизложенные экспериментальные данные, можно сделать вывод о возможности параллельной коммутации разрядников-обострителей серии РО-43 с разбросом менее 2 нс при использовании их в качестве обострителей выходных высокоэнергетичных импульсов для коаксиальных формирующих линий.

4.3 Выводы по главе

Впервые экспериментально показана возможность параллельной работы двух неуправляемых разрядников-обострителей серии РО-43 при подключении их в качестве нагрузки низкоимпедансной формирующей линии сопротивлением 10 Ом.

Установлено, что разброс времени срабатывания двухэлектродных неуправляемых разрядников-обострителей серии РО-43 при параллельной работе со скоростью нарастания напряжения более 10^{12} В/с и коммутируемой энергии ≈ 25 Дж не превышает 2 нс, а параллельная работа нескольких разрядников-обострителей с тем же разбросом возможна при условии , что время пробега волны плюс время, затраченное на формирование газового пробоя в разряднике будет больше времени разброса срабатывания разрядников относительно друг друга.

Уменьшение джоулевой нагрузки на неуправляемый двухэлектродный разрядник-обостритель серии РО-43, с целью увеличения его ресурса работы или повышения коммутируемой энергии возможно при увеличении количества параллельно включенных разрядников-обострителей, это не приведет в

мгновенному выходу их из строя, в случае если энергия , проходящая через один разрядник не превышает 25 Дж.

Впервые показано, что при коммутации энергии более 25 Дж через разрядник-обостритель РО-43 эго ресурс не ниже 10^3 импульсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные заключения и выводы по итогам выполненной работы, в соответствии с поставленными задачами по исследованию коммутационного узла ускорителя с накопителем энергии на основе низкоимпедансных формирующих линий:

В ходе выполнения работы разработан трехэлектродный газовый разрядник со сжатым газом для коммутации низкоомных коаксиальных формирующих линий с общей конструктивной индуктивностью на уровне 12 нГн.

Основной изолятор трехэлектродного разрядника с диаметром центрального отверстия равным 98 мм и внешним диаметром равным 264 мм изготовленный из блочного акрилового полимера марки ТОСН при воздействии давления в 2000 кПа прогибается не более чем 0,3 мм и способен выдерживать длительные циклические нагрузки. Толщина изолятора в зоне разделения жидкостного объема формирующей линии и газового объема разрядника составляет всего 14 мм Расчетная индуктивность участка изолятора составляет не более 5 нГн. Это позволило уменьшить общую индуктивность трехэлектродного разрядника с изолятором, но без учета искрового зазора до ~ 12 нГн.

Экспериментально установлено, что оптимальной атмосферой для высоковольтного трехэлектродного разрядника со сжатым газом, используемого для коммутации низкоимпедансной коаксиальной формирующей линии сопротивлением ≈5 Ом, является смесь, состоящая из азота с добавлением 10% элегаза.

Показано, что использование в трехэлектродном разряднике со сжатым газом и предразразрядником атмосферы, состоящей из смеси 90%N_2+10%SF_6 при коммутации низкоимпедансной коаксиальной формирующей линии сопротивлением менее 5 Ом и коммутируемом напряжении более 100 кВ, обеспечивает многоканальный пробой основных искровых промежутков с наименьшим разбросом по количеству каналов.

Экспериментально установлено, что время срабатывания основного зазора трехэлектродного разрядника в смеси $N_2$90%+$SF_6$10%, лежит в пределах от 2 до 6 нс со средним значением 4,12 нс и среднеквадратичным отклонением 1,3 нс. При этом полное среднее время срабатывания разрядника от момента начала формирования канала в предразряднике и до завершения формирования каналов в основном зазоре разрядника в смесеи $N_2$90%+$SF_6$10% составляет 11 нс со среднеквадратичным разбросом 1,5 нс соответственно.

Показано, что средний электрод, выполненный в виде тонкого диска с радиусом скругления кромки равным 0,5 мм, обеспечивает многоканальный пробой с высокой стабильностью числа искровых каналов от включения к включению при различном положении диска в междуэлектродном зазоре, а также стабильное соотношение числа искровых каналов, возникающих в искровых зазорах между основными электродами. При соотношении зазоров между средним электродом с одной стороны и высоковольтным, либо заземленным электродами с другой равном ~ 0.5 количество искровых каналов в каждом зазоре не опускается ниже 7.

Впервые экспериментально показана параллельная работа двух разрядников-обострителей серии РО-43 при подключении их в качестве нагрузки низкоимпедансной формирующей линии.

Установлено, что разброс времени срабатывания разрядников-обострителей серии РО-43 при параллельной работе со скоростью нарастания напряжения более 10^{12} В/с и коммутируемой энергии ≈ 25 Дж не превышает 2 нс.

Впервые показано, что при коммутации энергии более 25 Дж через разрядник-обостритель РО-43 эго ресурс не ниже 10^3 импульсов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц, Г. А. Импульсная энергетика и электроника / Г. А. Месяц. – М.: Наука. – 2004. – 704 с.

2. Ремнев Г. Е. Источник импульсных электронных и ионных пучков на основе наносекундного генератора напряжения с согласующим трансформатором / Г. Е. Ремнев, А. И. Пушкарев, Э. Г. Фурман и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т.309, №2. – С. 88-93.

3. Месяц, Г. А. Введение в наносекундную импульсную энергетику и электронику: курс лекций для физиков и инженеров / Г. А. Месяц, И. В. Пегель. – М.: ФИАН. – 2009. – 192 с.

4. Плазменные источники импульсных ускорителей ионов / Г. Е. Ремнев, А. А. Бухаркин, М. В. Журавлев, [и др.] // Труды VII международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», Улан-Удэ, 31 июля – 6августа 2023 года. – Улан-Удэ: Издательство Бурятского научного центра СО РАН, 2023. – С. 50-55. – DOI: 10.31554/978-5-7925-0655-8-2023-50-55

5. Pulsed Beam-plasma technologies. Promising practical use / G. Remnev, A. Baranova, I. Egorov [et al.] // Perspective plasma technologies: Abstract book of XIVth China-Russia-Belarus symposium, Tomsk, 11–14 ноября 2023 года. – Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2023. – P. 8-9.

6. Рыбин Ю. В. Генератор высоковольтных импульсов с фронтом субнаносекундной длительности, формируемым гиромагнитной передающей линией / Ю. В. Рыбин, В. В. Еремкин, А. С. Марабян // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – №1. – С. 88-92. DOI 10.31857/S0032816220060166.

7. Наносекундный генератор высоковольтных импульсов на основе искусственных двойных формирующих линий / В. А. Бурцев А. А. Бурцев, Д. Б. Бельский и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – №4. – С. 23-28. DOI 10.31857/S0032816220040114.

8. Ефремов А. М. Мощный источник сверхширокополосных импульсов синтезированного излучения / А. М. Ефремов, В. И. Кошелев, В. В. Плиско, Е. А.

Севостьянов // Приборы и техника эксперимента. – 2019. – №1. – С. 36-45. DOI: 10.1134/S003281621806006X.

9. Андреев С. В. Источник рентгеновского излучения среднего диапазона энергий на основе электронно-оптического преобразователя / С. В. Андреев, Н. С. Воробьев, Ю. М. Михальков и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – №2. – С. 93-99. DOI: 10.31857/S0032816221010237.

10. Ланцов В. Н. Мощные высоковольтные источники питания. Часть 3 / В. Н. Ланцов, Е. Н. Владимиров // Силовая электроника. – 2011. – Т.2, №30. – С. 49-56.

11. Коваль, Н. Н. Источники электронов с сеточным плазменным эмиттером: прогресс и перспективы / Н. Н. Коваль, В. Н. Девятков, М. С. Воробьев // Известия вузов. Физика. – 2020. – Т.63, №10(754). – С. 7-16. – DOI: 10.17223/00213411/63/10/7.

12. ООО «Импульсные технологии» г. Рязань [Офиц. сайт]. URL: https://www.pulsetech.ru (дата обращения: 10.10.2024 г).

13. АО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «ПЛАЗМА» г. Рязань [Офиц. сайт]. URL: https://www.plasmalabs.ru/ (дата обращения: 10.10.2024 г).

14. Месяц, Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов / Г. А. Месяц. – М.: Советское радио. – 1974. – 256 с.

15. Ковальчук, Б. М. Сильноточные наносекундные коммутаторы / Б. М. Ковальчук, В. В. Кремнев, Ю. Ф. Поталицын. – Новосибирск: Наука, 1979. – 175 с.

16. Искровые разрядники за рубежом/ А. М Бердичевский, Л. С Головина, Ю. В. Киселев, [и др.]. -Текст: непосредственный // Министерство электронной промышленности СССР. Серия: Электровакуумные и газоразрядные приборы. Обзоры по электронной технике. -1972. – вып 9(62)

17. Григорьев А. В. Сильноточный обостряющий разрядник с нелинейным элементом в цепи индуктивного накопителя с фольговым

размыкателем / А.В. Григорьев, А. Г. Новиков, В. В. Титков, Г. А. Шнеерсон // Приборы и Техника Эксперимента. 1980. №5. С.129-130.

18. Машовец Д. В. Тиристорный разрядник в генераторе импульсного магнитного поля / Д.В. Машовец, Д.В. Шамшур, М.А. Шахов // ПТЭ. 1980. № 5. С. 130-131.

19. Кочетов, И. А. Область применения MOSFET, IGBT, SiC, GaN / И. А. Кочетов, Н. В. Омельченко // Энергетические установки и технологии. – 2021. – Т. 7, № 2. – С. 44-49.

20. Винтрич, А. IGBT Gen.7 - революционная эволюция Эволюция технологии IGBT / А. Винтрич // Силовая электроника. – 2020. – № 1(82). – С. 18-25.

21. 1200-В IGBT с обратной проводимостью (RC-IGBT), оптимизированные для работы в режиме жесткой коммутации / К. Такахаши, С. Йошида, С. Ногучи [и др.] // Силовая электроника. – 2019. – № 5(80). – С. 28-32.

22. Martin, J. C. Nanosecond pulse techniques / J. C. Martin // Proceedings of the IEEE. – Vol. 80. – Issue: 6. – June 1992. – P. 934-945.

23. Бурцев, В.А. К вопросу об управляемом пробое разрядника с твёрдым диэлектриком / В.А. Бурцев // ЖТФ. – 1981. – Т.51, №8. – С. 1760-1761.

24. Воробьёв, Г. А. Электрический пробой твёрдых диэлектриков / Г. А. Воробьёв, Н. С. Несмелов // Известия вузов. Физика. – 1979. – №1. – С. 90-104.

25. Воробьев, А. А. Электрический пробой и разрушение твёрдых диэлектриков / А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев. – М.: Высшая школа. – 1966. – 440 с.

26. Руденко, Н. С. Исследование электрической прочности некоторых жидких диэлектриков при воздействии импульсов напряжения наносекундной длительности / Н. С. Руденко, В. И. Цветков // ЖТФ. – 1965. – Т.35, Вып.10. – С. 1126-1129.

27. Капишников, Н. К. Высоковольтные разрядники, наполненные трансформаторным маслом / Н. К. Капишников, В. М. Муратов, В. Я. Ушаков // ПТЭ. – 1978. – №4. – С. 124-128.

28. Воробьёв, Г. А. Электрический пробой твёрдых диэлектриков / Г. А. Воробьёв, С. Г. Еханин, Н. С. Несмелов // Физика твердого тела. – 2005. – Т.47, №6. – С. 1048-1052.

29. Месяц, Г. А. Разработка и исследование высоковольтных наносекундных импульсных устройств: дис. ... кандидата технических наук : 05.00.00. / Месяц Геннадий Андреевич ;Томский политехнический институт. - Томск, 1961. - 179 с.

30. Prestwich K. R. Nereus, A 250 kV, 80 kA electron beam generator / K. R. Prestwich // «IEEE Trans.». – 1971. – v. NS – 18, №3. – p. 491-493.

31. Smith I. High current pulsed electron beam generator / I. Smith, P. Champney, L. Hatch // «IEEE Trans.». – 1971. – v. NS – 18, №3. – p. 493-495.

32. Yonas G. Development and application of a 1mv, 1ma mylar dielectric pulsed electron accelerator and concepts for high-energy modular generator systems / G. Yonas, I. Smith, P. Spence // Eleventh Symposium on Electron, Ion, and Laser Beam Technology. – June 1971. – P. 1-35.

33. Месяц, Г. А. О возможности использования жидкостных разрядников в высоковольтных наносекундных импульсных схемах / Г. А. Месяц, Г. А. Воробьев // Известия высших учебных заведений Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Физика. – 1962. – Т. 5, № 3. – С. 21-23.

34. Ушаков, В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В. Я. Ушаков. – Томск: Издательство: Томск: ТГУ. – 1975. – 256 с.

35. Ушаков, В. Я. Физика пробоя жидких диэлектриков (История и современное состояние, вклад советских и российских ученых) / В. Я. Ушаков // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307, № 2. – С. 80-87.

36. Torshin, Y. V. Impulse electric breakdown in liquid hydrocarbons. the picture of the phenomenon in a strong nonuniform field with low probability of breakdown / Y. V. Torshin // High Temperature. – 2010. – Vol. 48, No. 5. – P. 629-638. – DOI 10.1134/S0018151X10050032

37. Bernstein B. «Aurora», an electron accelerator / I. Smith, P. Champney, L. Hatch // «IEEE Trans. Nucl. Sci». – 1973. – v. NS – 20, №3. Pt 2. – p. 294-300.

38. А. с. 738021 СССР, М. Класс Н 01 Т 1/00. Искровой разрядник / Н. К. Капишников, В. М. Муратов, В. Я. Ушаков (СССР). – № 2469220/24-07 ; заявл. 04.04.77 ; опубл. 30.05.80, 3 с. : ил.

39. Капишников Н.К. Генератор мощных наносекундных импульсов / Н.К. Капишников, Г. В. Липов, В.М. Муратов // Приборы и Техника Эксперимента. 1986. №5. С.100-104.

40. Киселев, Ю. В. Искровые разрядники / Ю. В. Киселев, В. П. Черепанов. – М.: «Сов. радио». – 1976. – 70 с.

41. Larsson A. Gas-Discharge Closing Switches and Their Time Jitter / A. Larsson // IEEE Transactions on plasma science. – 2021. – Vol. 40, №10. – p. 2431-2441.

42. Киселев, Ю. В. Искровые разрядники: учебное пособие / Ю. В. Киселев. – Рязань: РРТИ, – 1989.

43. Фрюнгель, Ф. Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов. Перевод с немецкого / Ф. Фрюнгель. – М.; Л.: Энергия. – 1965. – 488 с.

44. Shpak, V. G. Subnanosecond Front, High Voltage Generator based on a Combined Pulsed Forming Line / V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. R. Oulmascoulov, M. I. Yalandin // Proc.of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. – Baltimore, ML, USA. – V.2. – 1997, – P.1581-1585.

45. Маханько, Д. С. Разработка разрядников-обострителей с улучшенными техническими параметрами: дис. ... канд. Техн. наук : 2.2.1 : : защищена 24.06.25 / Маханько Дмитрий Сергеевич. – Рязань, 2025. - 174 с.

46. Мик, Дж. М. Электрический пробой в газах. Пер. с англ. / Под ред. д-ра техн. наук В. С. Комелькова. – М.: Изд-во иностр. лит. – 1960. – 605 с.

47. Королев, Ю. Д. Физика импульсного пробоя газов / Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц. – М.: Наука. – 1991, – 224 с.

48. Ретер, Г. Электронные лавины и пробой в газах. Пер. с нем. / Под ред. д-ра техн. наук В. С. Комелькова. – М.: Мир. – 1968. – 390 с.

49. Лозанский, Э. Д. Теория искры / Э. Д. Лозанский, О. Б. Фирсов. – М.: Атомиздат. – 1975. – 272 с.

50. Леб, Л. Основные процессы электрических разрядов в газах / Л. Леб. – М.: Гостехиздат. 1950. – 600 с.

51. Кремнев, В. В. О механизме развития импульсного наносекундного разряда в газе при одноэлектронном инициировании / В. В. Кремнев, Г. А. Месяц // ПМТФ. – 1971. – №1. – С. 40-45

52. Грановский, В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский – М.: Наука. 1971. – 543 с.

53. Месяц, Г. А. Время формирования разряда в коротких воздушных промежутках в наносекундном диапазоне времени / Г. А. Месяц, Ю. И. Бычков, А. М. Искольдский // ЖТФ. – 1968. – Т.38, №8. – С. 1281-1287.

54. Гайворонский, А. С. Расчетная модель распространения катодно-направленного стримера в воздушных промежутках с неоднородным полем / А. С. Гайворонский, И. М. Ражанский // ЖТФ. – 1986. – Т.56, №6. – С. 1110-1117.

55. Месяц Г. А. Законы подобия в импульсных газовых разрядах / Г. А. Месяц // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, вып. 10. – С. 1069-1091.

56. Ражанский, И. М. Физические процессы при разряде в воздушных промежутках Учеб. пособие для студентов III курса электроэнерг. фак. (спец. 0314) дневного отд-ния / И. М. Ражанский. — Новосибирск : НЭТИ, 1985. – 71 с.

57. Капцов, Н.А. Электрические явления в газах и вакууме : Учеб. пособие для ВУЗов и ВТУЗов / Н.А. Капцов. – М. ; Л. : ОГИЗ. Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1947. – 808 с.

58. Стабильность срабатывания частотного разрядника в режиме самопробоя при напряжении до 300 kV и коммутируемой энергии до 450 J / Б. М. Ковальчук, Ю. Д. Королев, Е. В. Кумпяк [и др.] // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 12. – С. 137-144.

59. Искровые разрядники за рубежом / Бердичевский А. М., Головина Л. С., Киселев Ю. В., Никитин В. В., Чуракова Л. А. // Москва: Институт "Электроника", 1972. Обзоры по электронной технике. Сер.: Электровакуумные и газоразрядные приборы; Вып. 9 (62). - Т. 63 - № 11. -СС. 2271 - 2275.

60. Kharlov, A. V. Arc motion and electrode erosion in high-current rail spark gaps / A. V. Kharlov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2010. – Vol. 38, No. 9 Part 2. – P. 2474-2478. – DOI 10.1109/TPS.2010.2052929.

61. Modeling of Electrode Erosion Process in Gas Spark Switch / Q. Sun, Q. Zhou, W. Yang [et al.] // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2023. – Vol. 43. – P. 1195-1215.

62. Electrode erosion properties of gas spark switches for fast linear transformer drivers / X. Li, Z. Pei, Y. Zhang [et al.] // Physics of plasmas. – 2017. – 122108. – P. 1-13.

63. Ресурс разрядников-обострителей серии РО-43 и РО-49 / Б. А. Козлов, Д. С. Маханько, Н. В. Вишняков, [и др.] // Труды 9-го Международного конгресса "Потоки энергии и радиационные эффекты" (EFRE-2024) : Материалы конгресса EFRE-2024, Томск, 16–21 сентября 2024 года. – Томск: TPU Publishing House, 2024. – С. 656-662. – DOI 10.56761/EFRE2024.S5-P-031702.

64. Koutsoubis J. M. Electrode erosion and lifetime performance of a high repetition rate, triggered, corona-stabilized switch in air / J. M. Koutsoubis, S. J. MacGregor // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2000. – Vol. 33. – P. 1093-1103.

65. Ашмарин, В. В. Ресурсные испытания и эрозионные характеристики разрядника с искажением поля / В. В. Ашмарин, А. А. Блохинцев // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 47-56.

66. Yao, H. Electrode erosion of a high energy impulse spark gap switch / H. Yao, Z. Zeng, J. Chen // Plasma Science & Technology. – 2005. – Vol. 7, No. 6. – P. 3157-3160.

67. Lifetime characteristic of three-electrode field-distortion gas switch of fast linear transformer driver / Y.Li, J. Jin, L. Chen [et al.] // High power laser and particle beams. – 2020. – Vol. 32, No. 3. – P. 1-8.

68. Comparison and Evaluation of Electrode Erosion Under High-Pulsed Current Discharges in Air and Water Mediums / Y. Liu, Z. Li, Q. Luo // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. – 2016. – Vol. 44, No. 7. – P. 1169-1177.

69. Review of the Mechanisms of Electrode and Insulator Erosion and Degradation in High Current Arc Environments / T. G. Engel, S. L. Wester, M. Kristiansen [et al.] // IEEE transactions on magnetics. – 1995. – Vol. 31, No. 1. – P. 709-713.

70. Фольрат, К. Физика быстропротекающих процессов, пер. с нем., англ. Под редакцией Н. А. Златина, / К. Фольрат, Г. Томер. –.: Т.1 – М.: Мир. – 1971. –520 с.

71. Гохберг, Б. М. Исследование электрической прочности газов / Б. М. Гохберг, Э. Я. Зандберг // ЖТФ. – 1942. – вып. 2-3, №2. – С. 94-98

72. Injector for Maryland ERA project: Design features and initial performance / J. K. Burton, J. J. Condon, W. H. Lupton [et al.] // IEEE Transactions on Nucl. Sci. – 1973. – Vol. NS-20, No. 3 Part 1. – P. 417-420.

73. А. с. 420030 СССР, М. Класс Н 01 Т 3/00. Управляемый разрядник / П. Н. Дашук (СССР). – № 1401810/24-07 ; заявл. 23.01.70 ; опубл. 15.03.74, 3 с. : ил.

74. Ковальчук, Б.М. Газовая смесь N2+SF6+Ar для разрядника высокого давления / Б.М. Ковальчук, В.А Лавринович., Ю.Ф Поталицын // Приборы и Техника Эксперимента. – 1979. – №2. – С.135-137.

75. Разряд в газе высокого давления, инициируемый пучком быстрых электронов / Б. М. Ковальчук, В. В. Кремнев, Г. А. Месяц [и др.] // ПМТФ. – 1971. С. 21-29.

76. Управляемый мегавольтный газонаполненный разрядник / В.М. Евдокимович, С.Б. Евлампиев, Г.С. Коршунов [и др.] // Приборы и Техника Эксперимента. – 1980. – №5. – С.127-128.

77. Маханько, Д. С. Электрическая прочность конструкции неуправляемого разрядника-обострителя на напряжение до 500 кв / Д. С. Маханько // Вестник РГРТУ. – 2021. – №78. – С. 188-197.

78. A triggered spark-gap switch for high-repetitionrate high-voltage pulse generation / K. Yan, E.J.M. van Heesch, S.A. Nair, A.J.M. Pemen // Journal of Electrostatics. – 2003. – №57. – P. 29-33.

79. Крастелев, Е. Г. Генератор мощных наносекундных импульсов с амплитудой напряжения до 300 кв и частотой повторения до 16 Гц для тонкого измельчения кварца / Е. Г. Крастелев, А. А. Седин, В. И. Тугушев // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5, № 11-12. – С. 956. – DOI 10.1134/S2079562914090115

80. Factors Affecting and Methods of Improving the Pulse Repetition Frequency of Pulse-Charged and DC-Charged High-Pressure Gas Switches / S. J. MacGregor, S.M. Turnbull, F. A. Tuema, O. Farish // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1997. – Vol. 25, No. 2. – P. 110-117.

81. Operating Features of a High-Voltage Spark Gap Switch with Gas Blow Normal to the Breakdown Path in a Repetitively Pulsed Mode / N. M. Bykov, A. V. Gunin, S. D. Korovin, Yu. D. Korolev // INSTRUMENTS AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES. – 2008. – Vol. 51, No. 6. – P. 838-845.

82. Евдошенко, Л. С. Расчет многоканального режима коммутации искровых разрядников и сравнение его результатов с экспериментом / Л. С. Евдошенко // Электротехника и электромеханика. – 2010. – №3. – С. 48-51.

83. А. с. 744805 СССР, М. Класс Н 01 Т 15/00. Многоканальный коммутатор / Е. И. Логачев, Г. Е. Ремнев, А. М. Толопа, Ю. П. Усов (СССР). – № 2552548/24-07 ; заявл. - ; опубл. 30.06.80, 3 с. : ил

84. Gerasimov, A. I. Multichannel spark gaps with control bar electrodes: Their development and application - (A review) / A. I. Gerasimov // Instruments and Experimental Techniques. – 2004. – Vol. 47, No. 1. – P. 1-31.

85. Харлов, А. В. Многокулонные газовые разрядники и их применение в импульсной технике (обзор) / А. В. Харлов // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 1. – С. 5-29. – DOI 10.31857/S0032816220060099

86. Стабильность срабатывания двухэлектродных разрядников высокого давления в режиме самопробоя при напряжениях несколько сотен киловольт / Н.В. Ландль, Ю.Д. Королев, В.В. Ростов [и др.] // Труды 9-го Международного конгресса "Потоки энергии и радиационные эффекты" (EFRE-2024) : Материалы конгресса EFRE-2024, Томск, 16–21 сентября 2024 года. – Томск: TPU Publishing House, 2024. – С. 406-411. – DOI 10.56761/EFRE2024.S4-P-017201.

87. Larsson, A. Gas-Discharge Closing Switches and Their Time Jitter / A. Larsson // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. – 2012. – Vol. 40, No. 10. – P. 2431-2441.

88. Искровой газовый разрядник на 200 кВ / Е. П. Большаков, В. В. Ершов, Ю. А. Истомин [и др.] // Доклады второй всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов : Ленинград, 23–25 июня 1981 года. – Ленинград, 1982. – С. 256-263.

89. Ашмарин, В. В. Разрядники с искажением поля с улучшенными временными характеристиками и повышенной надежностью / В. В. Ашмарин, Д. Г. Осипов // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 1. – С. 23-33. – DOI 10.47026/1810-1909-2022-1-23-33.

90. Крастелев, Е. Г. Усовершенствованный разрядник для генераторов импульсного напряжения установки "Стенд-300" / Е. Г. Крастелев, Ю. Г. Калинин, А. С. Черненко // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 2. – С. 35. – DOI 10.7868/S0032816214010273.

91. A Compact and Repetitively Triggered, Field-Distortion Low-Jitter Spark-Gap Switch / F. Song, F. Li, M. Zhu [et al.] // IEEE transactions on plasma science. – 2019. – Vol. 47, No. 8. – P. 4105-4113.

92. Пекарь, И.Р. Разрядники с искажением поля / И.Р. Пекарь, В. А. Бочаров, П.Н. Мельников // Приборы и Техника Эксперимента. – 1986. – №5. – С.104-106.

93. Markins, D. Command triggering of synchronized megavolt pulse generators / D. Markins // IEEE transactions on nuclear science. – 1971. – Vol. 18, No. 4, pt. 2. – P. 296-302.

94. Капишников, Н.К. Газонаполненный управляемый разрядник / Н.К. Капишников, В. М. Муратов // Приборы и Техника Эксперимента. – 1984. – №4. – С.233-137.

95. Хайлов, И. П. Исследование режимов работы двойной формирующей линии / И. П. Хайлов // Приборы и техника эксперимента. – 2015. – № 4. – С. 53-55. – DOI 10.7868/S0032816215040060.

96. А. с. 184342 СССР, Класс 21g, 12/03. Управляемый коммутатор / П. А. Воробьев, Б. М. Ковальчук, Г. А. Месяц (СССР). – № 1022877/26-25 ; заявл. 16.08.1965 ; опубл. 21.07.1966, 2 с. : ил.

97. А. с. 243063 СССР, Класс 21e, 37/01. Многоэлектродный разрядник / Б. М. Ковальчук, Г. А. Месяц, Ю. Ф. Поталицын (СССР). – № 1196198/26-25 ; заявл. 10.11.1967 ; опубл. 05.05.1969, 4 с. : ил.

98. Воробьев, П. А. Новый мощный управляемый наносекундный коммутатор / П. А. Воробьев, Г. А. Месяц, Ю. Ф. Поталицын // ЖТФ. – 1966. – Т.36, №8. – С. 1492-1498.

99. LeChien, K. R. Investigation of a multichanneling, multigap Marx bank switch / K. R. LeChien, J. M. Gahl // Review of Scientific Instruments. – 2004. – Vol. 75, No. 1. – P. 174-178.

100. Пекарь, И.Р Быстродействующая система коммутации высоковольтного генератора импульсных напряжений / И. Р. Пекарь // Приборы и Техника Эксперимента. – 1978. – №5. – С.125-128.

101. Multiple-gap spark gap switch / Z. Liu, K. Yan, G. J. J. Winands [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2006. – Vol. 77, № 073501. – P. 1-4.

102. Харлов, А. В. Многокулонные газовые разрядники и их применение в импульсной технике (обзор) / А. В. Харлов // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 1. – С. 5-29. – DOI 10.31857/S0032816220060099.

103. Меркулов, Б. П. Базовая конструкция газонаполненного металлокерамического разрядника высокого давления для импульсных источников рентгеновского излучения / Б. П. Меркулов, Г. В. Мельничук, Д. С. Маханько // Физика. Физическая химия. Термодинамика. – 2013. – №1. – С. 44-51.

104. Маханько, Д. С. Технологические аспекты производства разрядников-обострителей на напряжение до 500 кВ / Д. С. Маханько // Потоки энергии и радиационные эффекты (EFRE-2022) : Congress Proceedings, Tomsk, 02–08 октября 2022 года / Edited by Dr. Dmitry Sorokin and Anton Grishkov. – Tomsk: TPU Publishing House, 2022. – С. 334-339.

105. Патент № 2810296 C1 Российская Федерация, МПК H03K 3/53. высоковольтный импульсный источник : № 2023118791 : заявл. 17.07.2023 : опубл. 26.12.2023 / Г. Е. Ремнев, М. В. Журавлев, Г. Н. Курапов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет".

106. Проходной вакуумный изолятор секционированного типа для мощных импульсных ускорителей / А. А. Бухаркин, М. В. Журавлёв, Г. Н. Курапов [и др.] // Труды 9-го Международного конгресса "Потоки энергии и радиационные эффекты" (EFRE-2024) : Материалы конгресса EFRE-2024, Томск, 16–21 сентября 2024 года. – Томск: TPU Publishing House, 2024. – С. 505-509. – DOI 10.56761/EFRE2024.S4-P-034501.

107. Продукт для моделирования электрических полей ELCUT [Офиц. сайт]. URL: https://elcut.ru/index.htm / (дата обращения:19.08.2025 г).

108. Важов, В. Ф. Техника высоких напряжений. Курс лекций для бакалавров направления 140200 «Электроэнергетика» / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович, С. А. Лопаткин. – Томск.: Изд-во ТПУ. – 2006. – 119 с.

109. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей : справ, кн. / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – Л. : Энергоатомиздат. – 1986. – 488 с.

110. Продукт SOLIDWORKS SIMULATION [Офиц. сайт]. URL: https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-simulation / (дата обращения:19.08.2025 г).

111. Проверка качества сетки [Электронный ресурс]. https://help.solidworks.com/2020/russian/SolidWorks/cworks/c_Mesh_Quality_Checks.htm / (дата обращения: 19.08.2025 г).

112. Моделирование электрических полей трехэлектродного разрядника в сжатом газе с «искажением поля» и сравнение его коммутационных характеристик с двухэлектродным разрядником на самопробое / Г. Н. Курапов, А. А. Бухаркин, М. В. Журавлев [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. – DOI 10.30898/1684-1719.2025.11.12.

113. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда : монография / Ю. П. Райзер. — 3-е изд., перераб. и доп. — Долгопрудный : Издательский дом «Интеллект», 2009. — 736 с.

114. Гохберг Б. М. Элегаз — электрическая газовая изоляция / Б. М. Гохберг // «Электричество». – Москва: Госэнергоиздат. – 1947. – №3. – С.15.

115. Christophorou, L. G. Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF_6 / L. G. Christophorou, J. K. Olthoff, D. S. Green. — Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 1997. — 92 p.

116. Wang, X. Numerical Simulation of the Gas Discharge in a Gas Peaking Switch / X. Wang, H. Luo, Y. Hu // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2007. — Vol. 35, no. 3. — P. 702–708. — DOI 10.1109/TPS.2007.896963.

117. Breakdown in helium in high-voltage open discharge with subnanosecond current front rise / I. V. Schweigert [et al.] // Plasma Physics Reports. — 2016. — Vol. 42, no. 7. — P. 666–677. — DOI: 10.1134/S1063780X16070096.

118. Grothaus, M. G. Recovery Characteristics of Hydrogen Spark Gap Switches / M. G. Grothaus, S. L. Moran, L. W. Hardesty // Digest of Technical

Papers : Ninth IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, NM, USA, 1993 / ed. by K. R. Prestwich, W. L. Baker. – New York : IEEE, 1993. – P. 475–478.

119. Investigation of breakdown characteristics of N2, SF6 and SF6-N2 mixtures under pressure / L. Pecastaing, T. Reess, P. Espel [et al.] // Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering (London, 23–27 August 1999). – London : IET, 1999. – Vol. 3. – P. 224–227. – DOI: 10.1049/cp:19990740.

120. Breakdown indicators of SF6 and SF6/N2 mixtures / P. Osmokrovic, M. Vujisic, K. Stankovic [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2012. – Vol. 19, iss. 2. – P. 677–683. – DOI: 10.1109/TDEI.2012.6187428.

121. A calculation model for breakdown time delay and jitter of gas switches under hundred-nanosecond pulses and its application in a self-triggered pre-ionized switch / T. Wang, H. Wang, W. Chen [et al.] //Plasma Science and Technology. – 2021. – Т. 23. – №. 11. – P. 1-15.

122. Experimental investigation and theoretical analysis of the breakdown time delay and jitter of multi-gap gas switch gaps / Z. Wen, Z. Wang, S. Fan [et al.] //Review of Scientific Instruments. – 2023. – Т. 94. – №. 11. – P. 1-17. – DOI 10.1063/5.0168981.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Статья 2 квартиля по базам Web of Science и Scopus

1. Estimation of the neutron yield generated by neutron source based on pulsed power proton accelerator in 7Li (p, n) 7Be reaction / S. H. Li, S. Pavlov, Yu. Cherepennikov, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2025. – Vol. 1075. – P. 170442. DOI: 10.1016/j.nima.2025.170442.

Прочие статьи, индексируемые в базах Scopus и WoS

2. Multi-Channel Discharge and Closing Time Dynamics of a Three-Electrode Untriggered Spark Gap Switch / S. M. Martemyanov, G. N. Kurapov, M. V. Zhuravlev [et al.] // Plasma Physics Reports. — 2026. — Vol. 52, no. 11. — P. 1586–1591. — DOI: 10.1134/S1063780X26601884.

3. Acceleration of protons in a Luce diode with a Teflon anode / V. A. Ryzhkov, M. V. Zhuravlev, A. A. Bukharkin [et al.] // Technical Physics Letters. — 2024. — Vol. 50, no. 6. — P. 64–67. — DOI: 10.61011/TPL.2024.06.58483.19824.

4. Transport of an electron beam generated in a Plyutto–Luce diode through a vacuum channel / P. Glumac, M. V. Zhuravlev, A. A. Bukharkin [et al.] // Technical Physics Letters. — 2026. — Vol. 52, no. 6. — P. 5–7.

Статьи из перечня ВАК

5. Моделирование электрических полей трехэлектродного разрядника в сжатом газе с «искажением поля» и сравнение его коммутационных характеристик с двухэлектродным разрядником на самопробое / Г. Н. Курапов, А. А. Бухаркин, М. В. Журавлёв, и др. // Журнал радиоэлектроники. – 2025 – № 11. – p. 1-18. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.12.

6. Ускорение протонов в диоде Люса с тефлоновым анодом / В. А. Рыжков, М. В. Журавлев, А. А. Бухаркин [и др.] // Письма в Журнал

технической физики. – 2024. – Т. 50, № 12. – С. 24-27. – DOI 10.61011/PJTF.2024.12.58060.19824

7. Транспортировка в вакуумном канале электронного пучка, формируемого в диоде Плютто-Люса / П. Глумац, М. В. Журавлев, А. А. Бухаркин [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2026. – Т. 52, № 11. – С. 7-10. – DOI 10.61011/PJTF.2026.11.62858.20616

Патенты на изобретения

8. Пат. 2810296 C1 Российская Федерация, МПК H03K 3/53. Высоковольтный импульсный источник / Г.Е. Ремнев, М.В. Журавлев, Г.Н. Курапов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО НИ ТПУ. – № 2023118791; заявл. 17.07.23; опубл. 26.12.23, Бюл. № 36. – 7 с. – ил.

9. Пат. 2860974 C1 Российская Федерация, МПК H05H 5/00. Коллективный ускоритель ионов / Г.Е. Ремнев, М.В. Журавлев, Г.Н. Курапов, А.А.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО НИ ТПУ. – № 2025136149; заявл. 16.12.25; опубл. 28.04.26, Бюл. № 13. – 10 с. – ил.

Статьи и тезисы в сборниках трудов конференций

10. Kurapov, G. N. Switching characteristics of the guided three-electrode spark gap switch with pressurized gas pulses / G. N. Kurapov, A. A. Bukharkin, M. V. Zhuravlev // 16th International Conference on Gas Discharge Plasma and Their Applications (GDPA-2023). – 2023. – с. 74. Ufa, Russia.

11. Kurapov, G. N. Switching characteristics of the guided three-electrode spark gap switch with pressurized gas pulses / G. N. Kurapov, A. A. Bukharkin, M. V. Zhuravlev // 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024). – 2024. – с. 111. Tomsk, Russia.

12. Курапов Г. Н. Низкоиндуктивный газовый разрядник для коммутации высоковольтных коаксиальных линий Г. Н. Курапов [и др.] // Международная научно-техническая конференция «Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений для фундаментальных и прикладных исследований». – 2025 – С. 154-156.

Прочие публикации

13. Powerful high-voltage pulse generator of nanosecond dual pulses / M. V. Zhuravlev, A. A. Bukharkin, G. N. Kurapov // 16th International Conference on Gas Discharge Plasma and Their Applications (GDPA-2023). – 2023. – с. 73. Ufa, Russia.

14. Бухаркин А. А. Проходной вакуумный изолятор секционированного типа для мощных импульсных ускорителей / А. А. Бухаркин, М. В. Журавлёв, Г. Н. Курапов // Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2024). – 2024. – с. 505-509. Tomsk, Russia. doi: 10.56761/EFRE2024.S4-P-034501.

15. Плазменные источники импульсных ускорителей ионов / Г.Е. Ремнев, А.А. Бухаркин, М.В. Журавлев [и др.] // Труды VII международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника» 31 июля – 6 августа 2023 г., Республика Бурятия Под редакцией д-ра техн. наук М. С. Воробьёва Улан-Удэ Издательство Бурятского научного центра СО РАН, 2023. –С. 50-55. DOI: 10.31554/978-5-7925-0655-8-2023-50-55.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 810 296**(13) **C1**

(51) МПК
H03K 3/53 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H03K 3/53 (2023.08)

(21)(22) Заявка: **2023118791, 17.07.2023**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.07.2023

Дата регистрации:
26.12.2023

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **17.07.2023**

(45) Опубликовано: **26.12.2023** Бюл. № **36**

Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ФГАОУ ВО НИ ТПУ, Батурина Оксана Николаевна

(72) Автор(ы):
Ремнёв Геннадий Ефимович (RU),
Журавлёв Михаил Валерьевич (RU),
Курапов Григорий Николаевич (RU),
Бухаркин Андрей Андреевич (RU),
Кухта Владимир Романович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2402873 C1, 27.10.2010. RU 2340081 C1, 27.11.2008. RU 2034657 C1, 10.05.1995. JP 10057832 A, 03.03.1998. US 3914617 A1, 21.10.1975.**

(54) ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК

(57) Реферат:

Изобретение относится к области сильноточной импульсной техники, а именно к генераторам для формирования импульса, и может быть использовано для генерирования мощных высоковольтных импульсов микросекундной и наносекундной длительности. Высоковольтный импульсный источник содержит корпус, в котором размещены коммутирующий элемент, соединенные между собой импульсный трансформатор с магнитопроводом и емкостный накопитель, выполненный из параллельно соединенных между собой цилиндрических конденсаторов. В качестве коммутирующего элемента использован управляемый коммутатор, к аноду которого присоединен емкостный накопитель. Виток первичной обмотки импульсного трансформатора образован немагнитным проводящим цилиндром, размещенным в окне магнитопровода, и немагнитными проводящими шинами, расположенными вдоль корпуса. Один конец цилиндра соединен с выводами емкостного накопителя, а другой конец цилиндра соединен с катодом управляющего коммутатора и с немагнитными проводящими шинам. Вторичная обмотка импульсного трансформатора выполнена из двух параллельно соединенных спиралей, охватывающих магнитопровод, и присоединена одним концом к емкостному накопителю, а вторым концом подключена к выводу высоковольтного импульсного источника. Спирали вторичной обмотки, выполненные из немагнитного проводящего материала, изолированы жидким диэлектриком, наполняющим корпус. Виток вторичной обмотки импульсного трансформатора, находящийся под половинным потенциалом, гальванически соединен с магнитопроводом.В корпусе установлен дроссель, содержащий диэлектрический каркас, на который намотан по

RU 2810296 C1

RU 2810296 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 860 974**(13) **C1**

(51) МПК
H05H 5/00 (2006.01)
H05H 3/02 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H05H 5/00 (2026.01)

(21)(22) Заявка: **2025136149, 16.12.2025**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.12.2025

Дата регистрации:
28.04.2026

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **16.12.2025**

(45) Опубликовано: **28.04.2026** Бюл. № 13

Адрес для переписки:
634050, Томская обл., г. Томск, пр-кт Ленина, 30, ФГАОУ ВО "НИТПУ", УТТ, Селивановой Елене Евгеньевне

(72) Автор(ы):
Ремнёв Геннадий Ефимович (RU),
Журавлёв Михаил Валерьевич (RU),
Курапов Григорий Николаевич (RU),
Бухаркин Андрей Андреевич (RU),
Курапова Евгения Александровна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **GB 2235332 B, 25.05.1994. RU 2171017 C1, 20.07.2001. WO 2007093699 A2, 23.08.2007. CN 108869222 B, 10.09.2019. US 9657725 B2, 23.05.2017. RU 2810296 C1, 26.12.2023. RU 2517184 C2, 05.2014. ДУБИНОВ А.Е. Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом, Успехи физических наук, т.172, N11, 11.2002.**

(54) Коллективный ускоритель ионов

(57) Реферат:

Изобретение относится к области ускорительной техники, а более конкретно к ускорителям, использующим метод коллективного ускорения ионов импульсными электронными пучками из плотного плазменного сгустка. Технический результат - повышение эффективности создания плазмы электронным пучком, а также снижение потерь энергии электронного пучка при ускорении ионов. Коллективный ускоритель ионов содержит диодную систему, подключенную к генератору высоковольтных наносекундных импульсов. Диодная система содержит расположенные в корпусе катододержатель с взрывоэмиссионным острийным катодом и анодную пластину с отверстием по центру, импульсный газовый клапан с соплом в области отверстия анодной пластины и систему синхронизации импульсного газового клапана и генератора высоковольтных наносекундных импульсов. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов выполнен как генератор сдвоенных наносекундных импульсов одинаковой полярности с уменьшенной амплитудой первого импульса и с регулируемым интервалом паузы между импульсами на основе линейного трансформатора. 1 з.п. ф-лы, 1 ил.

RU 2860974 C1

RU 2860974 C1