

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка искровых коммутаторов с циркуляцией газа для ГИН Аркадьева-Маркса УДК 621.316.567:621.319.53

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Бугаев Игорь Владиславович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения материаловедения	Юдин Артем Сергеевич	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально – гуманитарных наук ШБИП	Старикова Екатерина Васильевна	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения контроля и диагностики ИШНКБ	Ахмеджанов Рафик Равильевич	д.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	К.Т.Н.		

Томск – 2018 г

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Универсальные компетенции	
P1	Способность <i>совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Способность <i>использовать иностранный язык в профессиональной сфере</i> .
P3	Способность применять на практике <i>навыки и умения в организации</i> научно-исследовательских и производственных работ, в <i>управлении</i> коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности
P4	Способность использовать методологические основы <i>научного познания и творчества</i> , научную информацию в развитии отрасли, навыки проведения работ с использованием <i>современных информационных технологий</i> ; синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	Способность применять <i>углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Способность <i>ставить и решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности
P7	Способность выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Способность выполнять инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Способность проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Способность проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Способность осваивать <i>новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Способность разрабатывать <i>рабочую проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; <i>составлять оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
 Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Бугаеву Игорю Владиславовичу

Тема работы:

Разработка искровых коммутаторов с циркуляцией газа для ГИН Аркадьева-Маркса	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 1799/с от 15.03.2018

Срок сдачи студентом выполненной работы:	09 июня 2018 года
--	-------------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Литературные данные, результаты при проведении НИР и прохождении практик.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1 Генератор импульсных напряжений Аркадьева – Маркса 2 Проектирование разрядника 3 Моделирование тепловых процессов в разрядной камере 4 Экспериментальная часть 5 Анализ данных 6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 7 Социальная ответственность
Перечень графического материала	Презентация в Microsoft PowerPoint
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант

Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Старикова Екатерина Васильевна
Социальная ответственность	Ахмеджанов Рафик Равильевич
Разделы, выполненные на иностранном языке	Квашнина Ольга Сергеевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: раздел 4, экспериментальная часть	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22 января 2018 г.
---	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения материаловедения	Юдин Артем Сергеевич	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМб1	Бугаев Игорь Владиславович		

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Уровень образования: магистр
Отделение материаловедения
Период выполнения: 2017/2018 учебный год

Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы: 08 июня 2018 г.

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01/04/17	Литературный обзор	20
06/05/17	Расчетно-конструкторская часть	30
29/05/17	Экспериментальная часть	30
13/04/17	Финансовый менеджмент	5
17/04/17	Социальная ответственность	5
27/04/17	Разделы, выполненные на иностранном языке	10
		<i>Сумма: 100 баллов</i>

Составил руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения материаловедения ИШНПТ	Юдин Артем Сергеевич	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	К.Т.Н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Бугаеву Игорю Владиславовичу

Школа	Новых производственных технологий	ООП	Техника и физика высоких напряжений
Уровень образования	магистратура	Направление	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Бугаеву Игорю Владиславовичу

Школа	Новых производственных технологий	ООП	Техника и физика высоких напряжений
Уровень образования	магистратура	Направление	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 140 страниц, 80 рисунков, 28 таблиц, 42 источника и 2 приложений.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЕ РАЗРУШЕНИЕ, ИСКРОВОЙ РАЗРЯД, ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ЭРОЗИЯ ЭЛЕКТРОДОВ, ВРЕМЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ЗАЖИГАНИЯ РАЗРЯДА, ПРЕДЫОНИЗАЦИЯ РАЗРЯДНОГО ПРОМЕЖУТКА.

Объектом исследования является герметичная камера разрядников генератора Аркадьева–Маркса, включающая один управляемый и одиннадцать неуправляемых разрядников с предыонизацией разрядного промежутка коронным разрядом.

Цель работы – разработка разрядника, удовлетворяющего требованиям устойчивой работы ГИН в частотном режиме для электроимпульсного бурения.

В процессе исследования проводились проектирование и сборка управляемого разрядника с иницированием на принципе «искажения поля», разработка системы отвода тепла от электродов разрядника, получение данных по эрозии электродов и расчет предполагаемого ресурса работы разрядника, определение времени запаздывания зажигания разряда.

Основные конструктивные, технологические и технико – эксплуатационные характеристики: емкость конденсатора ступени ГИН $C_k = 0,35$ мкФ; разрядники помещены в камеру под давлением 2 – 3 атм; первая ступень – трехэлектродный разрядник работающий на принципе «искажения поля»; зарядное напряжение $U_0 = 30$ кВ; максимальный разрядный ток $I_{\text{макс}} = 12$ кА; тороидальная форма основных электродов.

Область применения: электроразрядные технологии; экспериментальные стенды для проведения лабораторных работ.

ABSTRACT

Graduation qualification work consists of 140 pages, 80 drawings, 28 tables, 42 source and 2 applications.

Keywords: ELECTRIC DISCHARGE DESTRUCTION, SPARK DISCHARGE, PULSE VOLTAGE GENERATOR, ELECTRODE EROSION, DISCHARGE IGNITION DELAY TIME, PREIONIZATION OF THE DISCHARGE GAP.

The object of the study is a sealed chamber of Arkadiev-Marx generator spark gap, including one controlled and eleven uncontrolled spark gap with preionization of the discharge gap by a corona discharge.

The purpose of the work is to design a surge arrester that meets the requirements of stable operation of the GIN in the frequency mode for electric impulse drilling.

The research process consists of designing and assembling a controlled discharger with initiation on the principle of "field distortion", developing a system for removing heat from the spark gap electrodes, obtaining data on erosion of electrodes and calculating the expected operating life of the arrester, determining the ignition delay time of the discharge.

The main design, technological and technical and operational characteristics: capacitance of the GIN stage capacitor $C_k = 0,35 \mu\text{F}$; dischargers are placed in the chamber at a pressure of 2 to 3 atm; the first stage - a three-electrode discharger operating on the principle of "field distortion"; charging voltage $U_0 = 30 \text{ kV}$; maximum discharge current $I_{\text{max}} = 12 \text{ kA}$; toroidal form of the main electrodes.

Scope: electric discharge technologies; experimental stands for laboratory work.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

искровой разрядник: безнакальный двух- или трехэлектродные приборы, способные под воздействием приложенного напряжения резко изменять свою проводимость и пропускать большие токи.

время запаздывания срабатывания разрядника: это сумма времени запаздывания зажигания разряда и времени его формирования.

время запаздывания зажигания разряда: интервал времени между моментом приложения напряжения к межэлектродному промежутку и моментом появления в нем первого иницирующего электрона, способного привести к пробое.

время формирования разряда: интервал времени между появлением иницирующего электрона и пробоем промежутка.

генератор импульсных напряжений: высоковольтное устройство, работа которого основана на медленном параллельном заряде группы конденсаторов и в быстром их разряде через искровые промежутки по последовательной схеме.

коронный разряд: самостоятельный газовый разряд, возникающий в резко неоднородных полях у электродов с большой кривизной поверхности (острия, тонкие провода).

электроимпульсное бурение: разрушение горной породы мощным электрическим разрядом (пробоем) высокого напряжения (до 200 кВ), происходящим в приповерхностной зоне забоя скважины, заполненной жидким диэлектриком.

электрическая эрозия электродов: изменение формы и состояния поверхности электродов, сопровождающееся загрязнением газовой среды и поверхности изоляции, возникающее при протекании больших импульсных токов через разрядник.

Оглавление

Введение	12
1.1 Принцип работы генератора импульсных напряжений по схеме Аркадьева-Маркса.....	14
1.1.1 Схема замещения зарядной цепи ГИН	15
1.1.2 Схема замещения разрядной цепи ГИН	17
1.2 Виды коммутаторов, применяемых в генераторе Аркадьева-Маркса.....	18
1.2.1 Простейший шаровой разрядник	19
1.2.2 Тригатрон.....	19
1.2.3 Разрядник с искажением поля.....	20
1.2.4 Разрядник с поверхностным разрядом	21
1.2.5 Многоззорный разрядник	22
1.2.6 Усовершенствованный разрядник с искажением поля Р – 200 установки «Стенд-300»	23
1.2.7 Высоковольтный газовый коммутатор с прокачкой газа поперек канала пробоя	24
1.2.8 Тиратрон.....	26
1.2.9 Тиратрон с холодным катодом	28
1.2.10 Вакуумный разрядник	28
1.3 Характеристики искровых газонаполненных коммутаторов, возможности и ограничения	29
1.3.1 Основные характеристики	29
1.3.2 Время запаздывания срабатывания разрядника.....	30
1.4 Факторы, влияющие на стабильность характеристик искровых газонаполненных коммутаторов	32
1.4.1 Эрозия электродов при коммутации больших импульсных токов	32
1.4.2 Повышенные температуры электродов в зоне разряда	36
1.5 Методы и подходы уменьшения влияния дестабилизирующих факторов	36
1.5.1 Постоянное или периодическое обновление газа	37
1.5.2 Фильтрация газа.....	40

1.5.3 Теплоотвод от электродов частотных газонаполненных искровых коммутаторов.....	42
2 Проектирование разрядника	44
2.1 Моделирование конструкции разрядника	44
2.2 Реализация разработанного разрядника	47
3 Моделирование тепловых процессов в разрядной камере.....	49
3.1 Расчет мощности, выделяемой на одном разрядном промежутке	49
3.1 Моделирование теплового режима на электродах	53
4 Экспериментальная часть	58
4.1 Время запаздывания срабатывания разрядника.....	58
4.1.1 Цель и методика эксперимента	58
4.1.2 Результаты эксперимента.....	63
4.2 Электрическая эрозия электродов в генераторе импульсных напряжений	71
4.2.1 Цель и методика эксперимента	71
4.2.2 Результаты измерений и расчетов	72
4.3 Электрическая эрозия электродов в разрядной камере	79
4.3.1 Цель и методика эксперимента.....	79
4.3.2 Результаты измерений и расчетов	82
4.3.3 Изменение температуры электродов	87
Заключение	89
5 Финансовый менеджмент	92
6 Социальная ответственность	106
Список публикаций студента	117
Список используемых источников.....	119
Приложение А. Determining the delay time of triggering of commutator	123
Приложение Б. Характеристики разрядников	138
CD-диск. " Разработка искровых коммутаторов с циркуляцией газа для ГИН Аркадьева-Маркса "	

Введение

Для реализации электроразрядного (электроимпульсного) способа разрушения горных пород требуется источник импульсов высокого напряжения с определенными временными и энергетическими характеристиками. Схемы формирования высоковольтных импульсов для электроразрядной технологии (ЭРТ) должны отвечать двум условиям: в стадии инициирования и развития пробоя требуется получение импульсов напряжения с определенной амплитудой и крутизной фронта, а в завершающей (канальной) стадии разряда требуется обеспечить ток для оптимального режима энерговыклада. В исследованиях, проводившихся в лабораторных условиях, были апробированы различные схемы формирования высоковольтных импульсов напряжения: емкостные многоступенчатые генераторы импульсов напряжения (ГИН), источники с индуктивными накопителями энергии, источники с формирующими кабельными линиями.

В ЭРТ наибольшее применение нашли емкостные многоступенчатые ГИН, отличающиеся простотой конструкции и обслуживания, и позволяющие получать необходимые для ЭРТ импульсы напряжения амплитудой (200 – 600) кВ и энергией в импульсе – $(0,1 - 50) \cdot 10^3$ Дж, которым не было (в период зарождения ЭРТ) и нет (в настоящее время) достойной альтернативы, в особенности применения ЭРТ в разрушении горных пород, в частности для бурения скважин [1].

Одной из проблем широкомасштабного внедрения электроразрядной технологии является несоответствие в полной мере высоковольтной техники требованиям, предъявляемым к ней со стороны ЭРТ. Речь идет об обязательно большом ресурсе работы (многие миллионы импульсов) и высокой частоте срабатывания (не менее 10 имп/с) источников высокого импульсного напряжения. «Слабыми звеньями» являются высоковольтные импульсные конденсаторы и искровые разрядники.

Для нормальной работы ГИН в частотном режиме должна быть достигнута стабильность срабатывания разрядников. Следовательно, они должны обладать большим ресурсом работы. Для этого необходимо использование формы и материала электродов, которые обеспечивают малую эрозию. Так же на стабильность работы влияет рабочая температура электродов, которая неизбежно увеличивается с течением времени при работе ГИН. Особо остро проблема начинает проявляться, например, при помещении разрядников в камеру под высоким давлением. Критерием для выбора материала камеры могут быть: масса-габаритные характеристики, термостойкость, дешевизна и др. Одним из вариантов исполнения может являться труба из полипропилена – термостойкого материала, температура плавления которого достигает 175 °С [2]. Но в частотном режиме ГИН даже такого значения может не хватать для нормальной работы.

Цель: разработка разрядника, удовлетворяющего требованиям устойчивой работы ГИН в частотном режиме для электроимпульсного бурения.

Объект исследования: герметичная камера разрядников генератора Аркадьева–Маркса, включающая один управляемый и одиннадцать неуправляемых разрядников с предионизацией разрядного промежутка коронным разрядом.

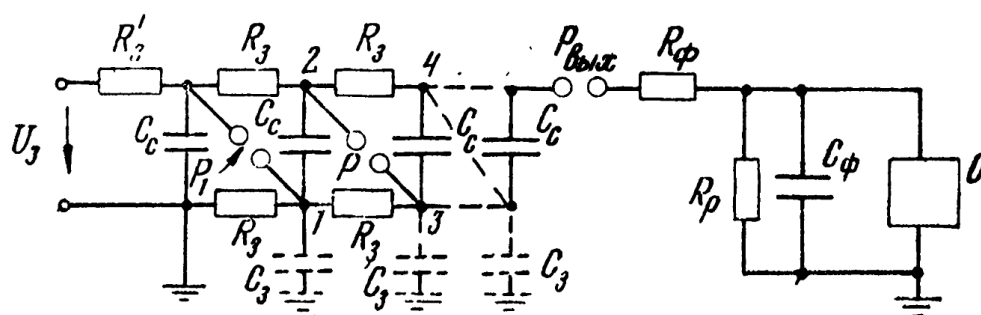
Научная новизна: впервые получены данные о ресурсе работы электродов из нержавеющей стали многоступенчатого разрядника в газе под давлением при работе в генераторе Аркадьева–Маркса в длительном режиме с частотой следования импульсов от 5 до 8 имп/сек. с энергией в импульсе 2 кДж.

Практическая значимость: Результаты данной работы могут быть использованы в импульсной технике, а также в дальнейших исследованиях.

1. Генератор импульсных напряжений Аркадьева – Маркса

1.1 Принцип работы генератора импульсных напряжений по схеме Аркадьева-Маркса

Генератор импульсных напряжений (ГИН) представляет собой систему конденсаторов, которые заряжаются в течение длительного времени при их параллельном соединении, а при достижении на конденсаторах заданных (зарядных) напряжений, разряжаются при последовательном соединении через искровые разрядники за короткий промежуток времени [3]. Таким путем при n конденсаторах на напряжение U можно получить номинальное напряжение $n \cdot U$. При емкости C – единичных конденсаторов в последовательном соединении получим емкость C/n (так называемая «емкость в ударе») [4]. Принципиальная схема ГИН приведена на рисунке 1,



U_z – зарядное напряжение; R'_z – защитное сопротивление;

C_c – конденсатор ступени ГИН; P – разрядник; R – зарядное сопротивление;

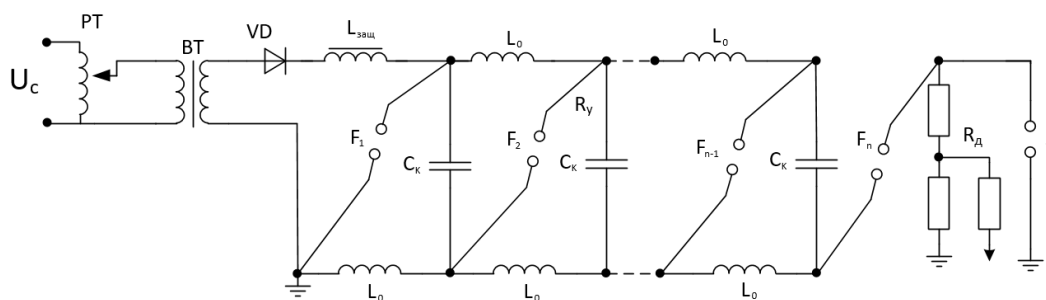
C_z – емкость элементов ГИН относительно земли; $P_{\text{вых}}$ – выходной разрядник; R_f – фронтовое сопротивление; R_p – разрядное сопротивление;

C_f – фронтовая емкость; O – объект испытания

Рисунок 1 – Принципиальная схема ГИН [5]

Наличие в схеме большого сопротивления (защитного и разделительных) ограничивает ток и приводит к потере энергии. Поэтому ГИН с зарядными резисторами используются для генерирования импульсов с частотой не более 1-2 имп/сек. и не предназначены для длительной работы.

Для работы ГИН в длительном режиме с частотой десятки имп/с. заряд конденсаторов происходит через защитный дроссель и зарядные индуктивности (см. рисунок 2).

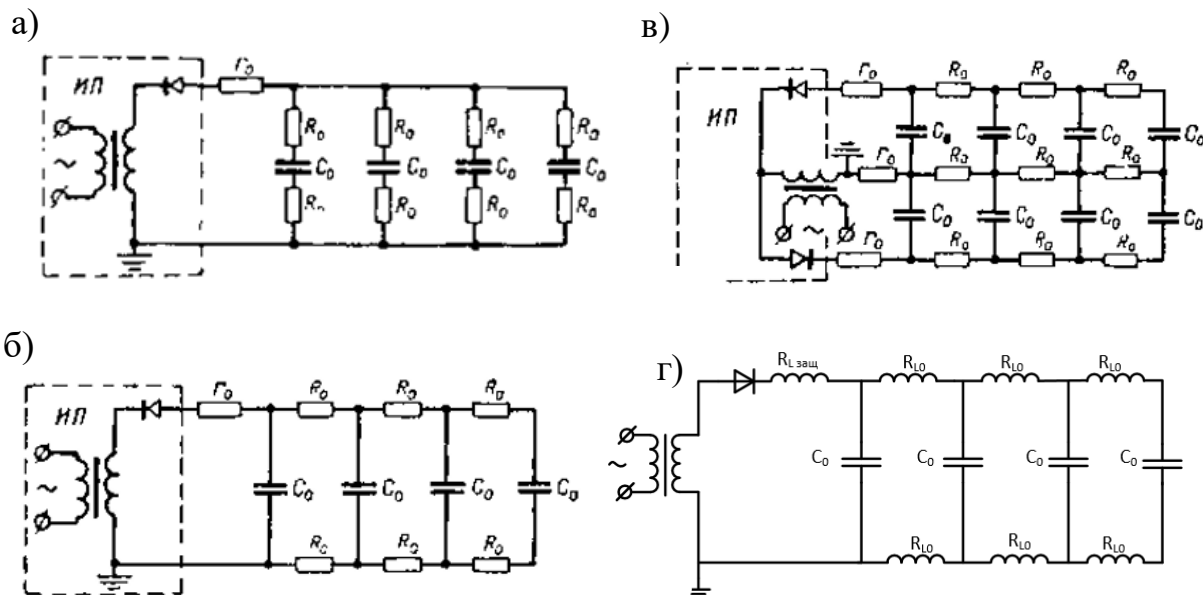


U_c – напряжение сети; PT – регулировочный трансформатор; VT – высоковольтный трансформатор; VD – выпрямительное устройство; $L_{защ}$ – защитный дроссель; L_0 – зарядная катушка индуктивности; $F_{1...n}$ – искровой промежутки; R_d – сопротивление делителя напряжения; S – выходной искровой промежутки

Рисунок 2 – Схема генератора импульсных напряжений с зарядом через индуктивности

1.1.1 Схема замещения зарядной цепи ГИН

На рисунке 3 показаны возможные схемы зарядной цепи многоступенчатого ГИН. В схеме (рисунок 3, а) все конденсаторы заряжаются одновременно через одинаковые сопротивления. К моменту разряда на конденсаторных ступенях устанавливаются равные напряжения, что способствует лучшему использованию ГИН. Недостатком схемы с независимым зарядом конденсаторных ступеней является необходимость увеличения линейных размеров сопротивлений от ступени в связи с возрастанием напряжений на них в момент разряда; поэтому указанная схема нашла применение лишь при небольших напряжениях ГИН (до 300-500 кВ) [3].



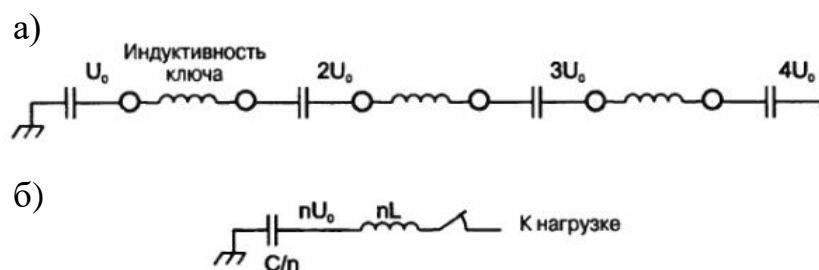
а) – независимый заряд ступеней; б) – заряд через нарастающее количество R_0 ; в) – схема с удвоением напряжения; г) – зарядная схема с индуктивностями; ИП – источник питания; r_0 – защитное сопротивление; R_0 – зарядное сопротивление; $R_{L\text{зщ}}$ – активное сопротивление защитного дросселя; R_{L0} – активное сопротивление зарядных катушек индуктивностей.

Рисунок 3 – Схемы заряда конденсаторных ступеней в многоступенчатом ГИН [3]

В схемах (см. рисунок 3, б) с повышением номера ступени зарядное сопротивление увеличивается, поэтому заряд конденсаторных ступеней происходит неравномерно. В случае быстрого подъема напряжения в таких схемах заряд конденсаторов верхних ступеней запаздывает. Напряжения на конденсаторах выравнивается только в случае большой длительности процесса заряда. Однако достоинством такой схемы является возможность применения во всех ступенях зарядных сопротивлений одинаковой конструкции, так как при разряде ГИН они находятся в равных условиях. По этой причине схемы (см. рисунок 3, б, в) нашли широкое применение [3]. Схема с зарядными катушками индуктивности (см. рисунок 3, г) позволяет обеспечить более быструю и одновременную зарядку всех конденсаторов, что позволяет работать в частотном режиме.

1.1.2 Схема замещения разрядной цепи ГИН

После срабатывания разрядников схема генератора приобретает вид, показанный на рисунке 4.



L – суммарная индуктивность конденсатора, проводников, соединяющих его с разрядниками, и самих разрядников, U_0 – зарядное напряжение, n – число ступеней

Рисунок 4 – Конфигурация схемы генератора после пробоя всех промежутков (а) и эквивалентная схема (б) [6]

Полная схема замещения разрядного контура ГИН представлена на рисунке 5. В этой схеме: C_1 –емкость генератора в разряде; R_1 – суммарное активное сопротивление разрядной цепи генератора; L_1 и L_2 –индуктивности элементов генератора и петли подсоединения объекта, R_2 – сопротивление разрядного контура; C_2 – сумма емкости объекта C_n , паразитной емкости генератора C_n ; R_n – активное сопротивление нагрузки.

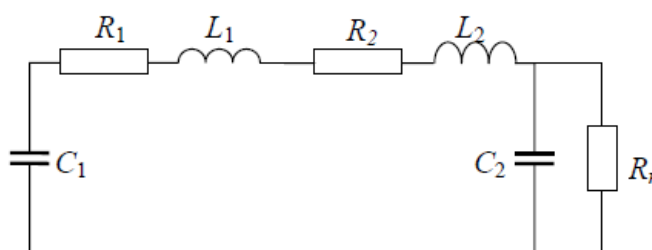


Рисунок 5 – Схема замещения разрядной цепи

Из-за большого числа последовательно соединенных элементов индуктивность разрядной схемы ГИН L_1 может достигать значений - $10 - 10^2$ мкГн, R_1 - единицы-десятки. Это приводит к ограничению тока в контуре и

искажению формы импульса. Для уменьшения L_1 и R_1 используют минимальные по длине соединительные провода, уменьшают расстояния между электродами воздушных промежутков, используют малоиндуктивные конденсаторы. На форму выходного сигнала также оказывает влияние паразитная емкость ГИН $C_{\text{п}}$.

1.2 Виды коммутаторов, применяемых в генераторе Аркадьева-Маркса

В генераторах Маркса используются самые разнообразные типы коммутирующих устройств, существенно различающихся по уровню рабочего напряжения и максимальному значению коммутируемого тока, времени коммутации и многим другим параметрам. Основные требования, предъявляемые к коммутирующим устройствам:

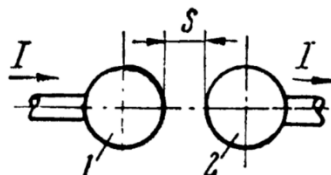
- 1) Широкий диапазон рабочих напряжений;
- 2) Большое сопротивление до включения;
- 3) Минимальное (близкое к 0) сопротивление после включения;
- 4) Минимальная индуктивность;
- 5) Предельно короткое время включения;
- 6) Обеспечение высокой частоты следования импульсов, т.е. малое время возврата в начальное состояние;
- 7) Ресурс работы.

Выбор коммутатора для генератора импульсных напряжений также будет основываться на особенностях работы ГИН для ЭИ бурения:

- 1) Высокая частота следования импульсов: $f = 10$ имп/с;
- 2) Длительность фронта импульса: $t_{\text{ф}} < 1$ мкс;
- 3) Большая энергия в импульсе (может достигать 2000 Дж);
- 4) Постоянный нагрев электродов и их эрозия;
- 5) Ток разряда ~ 10 кА;
- 6) Средний ток ~ 5 А.

1.2.1 Простейший шаровой разрядник

Простейший разрядник представляет собой два электрода (обычно сферической формы), закрепленных в изоляционной конструкции (см. рисунок 6). Расстояние S между электродами 1 и 2 выбирается таким, чтобы при зарядке накопителя пробой разрядника произошел при требуемом рабочем напряжении.



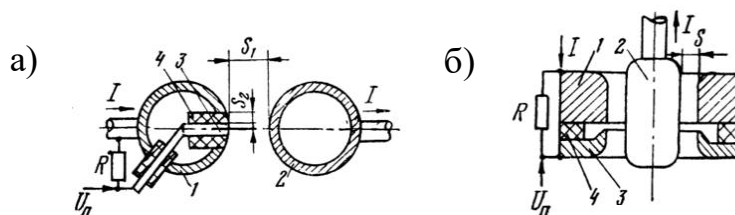
1,2 – электроды

Рисунок 6 – Шаровой разрядник [5]

Главным недостатком таких разрядников является отсутствие синхронизации, т.е. невозможность точного управления моментом срабатывания.

1.2.2 Тригатрон

Простейшим разрядником с управлением моментом срабатывания является тригатрон, изображенный на рисунке 7. Он содержит также два основных электрода 1 и 2, но в одном из электродов размещается вспомогательный электрод 3, закрепленный на изоляторе 4.



1,2 – основные электроды; 3 – вспомогательный электрод;
4 – изолятор [5]

Рисунок 7 – Тригатрон

Тригатрон обладает ограниченной зоной рабочих напряжений, при которых наблюдается его устойчивая работа. Ширина зоны зависит от $U_{\text{п}}$ и величины заряда q , протекшего от источника поджига.

Время запаздывания срабатывания тригатрона t_3 при одном и том же импульсе управления $U_{\text{п}}$ зависит от рабочего напряжения (см. рисунок 8, б). При приближении рабочего напряжения к $U_{\text{ст}}$ оно минимально (для воздушных тригатронов t_3 может достигать 10^{-8} с), а при $U_{\text{мин}}$ t_3 резко возрастает.

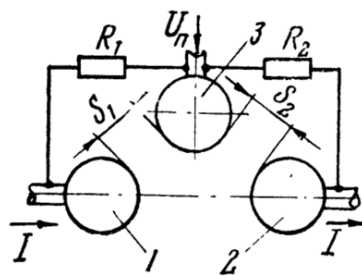
Основным недостатком тригатрона, показанного на рисунке 7, а, является невысокий ресурс работы из-за возникновения канала всегда в одном месте, что приводит к быстрой эрозии металла электродов. Этот недостаток в значительной степени устраняется в разряднике, показанном на рисунке 7, б. В нем основные электроды 1 и 2 имеют развитые поверхности, расстояние S между ними не регулируется. Если разряд происходит многократно в одном и том же месте, то расстояние между электродами в результате эрозии увеличивается, и зона возникновения разрядов перемещается. Тем самым обеспечивается длительная работа разрядника. Для расширения зоны рабочих напряжений меняется давление газа в разряднике.

В одной из конструкций разрядников, принцип устройства которых показан на рисунке 8, б, достигнуты следующие параметры: диапазон рабочих напряжений — от 15 до 50 кВ (давление воздуха от 0,1 до 0,4 МПа); коммутируемый ток — 350 кА длительностью 10^{-4} с; время запаздывания — менее 30 нс; ресурс работы — более 10^4 импульсов при диаметре электрода 2, равным примерно 120 мм.

1.2.3 Разрядник с искажением поля

Следующей разновидностью является разрядник с управлением за счет искажения поля между электродами (см. рисунок 8). В нем помимо основных электродов 1 и 2 (обычно сферической формы) имеется вспомогательный

электрод 5, потенциал которого в процессе зарядки накопителя задается делителем $R_1—R_2$.



1,2 – основные электроды; 3 – вспомогательный электрод

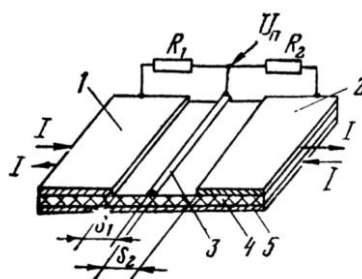
Рисунок 8 – Разрядник с искажением поля [5]

Срабатывание разрядника начинается с подачи управляющего импульса на вспомогательный электрод. Последовательность пробоя зависит от полярности поджигающего импульса.

Недостаток такого разрядника — узкий диапазон рабочих напряжений, который, однако, может быть расширен регулировкой расстояний между электродами.

1.2.4 Разрядник с поверхностным разрядом

Во многих случаях требуется обеспечить минимальную индуктивность разрядника. Этого можно добиться, используя разрядник с поверхностным разрядом (см. рисунок 9)



1,2 – основные электроды; 3 – вспомогательный электрод; 4 – изолятор;
5 – обратный токопровод

Рисунок 9 – Разрядник с поверхностным разрядом [5]

В данной системе электродов преобладает ярко выраженная нормальная составляющая электрического поля. Уменьшение индуктивности обусловлено возникновением большого количества скользящих разрядов при подаче на электрод 3 импульса напряжения с крутым фронтом, что приводит к многоканальному пробую разрядника.

Главными недостатками такого разрядника являются трудности обеспечения требуемой крутизны пускового импульса и повышенный шум при разрядах в случае открытого исполнения разрядника.

1.2.5 Многозазорный разрядник

С увеличением рабочего напряжения накопителя возрастают трудности создания коммутаторов. При напряжениях выше 10^5 В целесообразно использовать многозазорные разрядники, в которых рабочий промежуток разбивается на несколько (до 10–15). Каждый из них образован двумя электродами, создающими электрическое поле, близкое к однородному. Распределение рабочего напряжения по зазорам осуществляется делителем из резисторов R (см. рисунок 10, а).

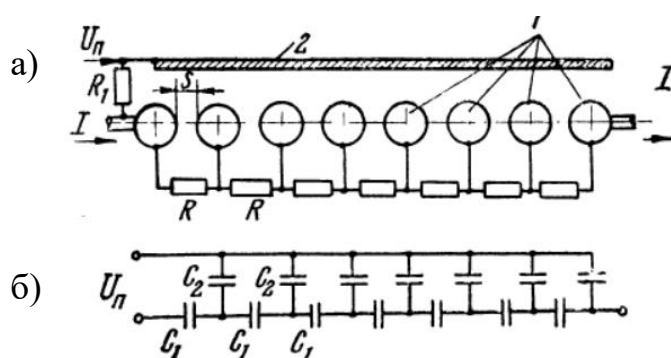


Рисунок 10 – Многозазорный разрядник (а) и его схема замещения (б) [5]

Разрядник срабатывает за счет перенапряжений, возникающих на отдельных промежутках при подаче импульса управления U_n на электрод 2. Перенапряжения получаются за счет неравномерного распределения U_n по

емкостям C_1 между электродами. Для получения большей неравномерности разрядник конструируется так, чтобы емкости между электродом управления и каждым электродом разрядника C_2 были больше, чем C_1 .

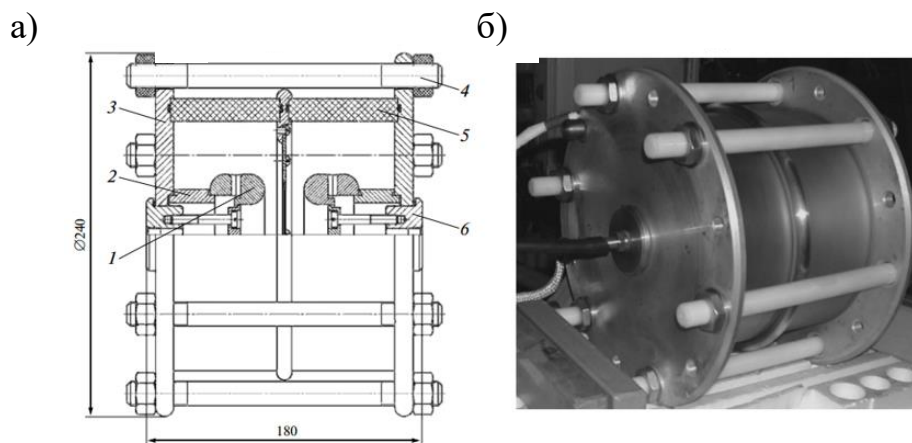
К недостаткам многоззорных разрядников следует отнести увеличенное время срабатывания за счет последовательного пробоя отдельных промежутков, а также несколько увеличенные потери энергии за счет наличия большого количества приэлектродных областей в каналах разрядов. Достоинства многоззорных разрядников — достижение высоких рабочих напряжений, большой диапазон рабочего напряжения.

1.2.6 Усовершенствованный разрядник с искажением поля Р – 200 установки «Стенд-300»

В [7] рассматривается усовершенствованный разрядник, используемый в ГИН установки «Стенд-300» (далее С-300) НИЦ «Курчаковский институт» импульсной мощностью 10 ТВт. В С-300 в генераторах импульсных напряжений используются трехэлектродные искровые разрядники с «искажением поля» на максимальное напряжение до 200 кВ.

Искровой промежуток разрядников Р - 200 образован двумя основными электродами с тороидальной рабочей поверхностью и расположенным посередине между ними третьим (управляющим) электродом в виде тонкого диска с отверстием. Электродная система помещена в камеру с азотом под давлением 1,5 -3 атм.

Выбор тороидальной системы электродов обусловлен большой площади рабочей поверхности (зоны разрядов), что позволяет увеличить ресурс работы разрядника, а также в более широком диапазоне управляемости разрядника [7]. Конструкция разрядника и внешний вид показаны на рисунке 11.



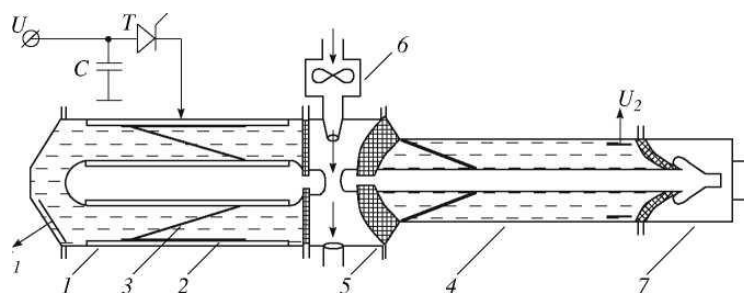
1 – тороидальный электрод (Р - 200), 2 – втулка, 3 – фланец, 4 – шпилька,
5 – секция изоляционного корпуса, 6 – торцевой элемент

Рисунок 11 - Конструкция (а) и внешний вид (б) доработанного варианта разрядника [7]

1.2.7 Высоковольтный газовый коммутатор с прокачкой газа поперек канала пробоя

В [8] описан разрядник с рабочим газом азотом при давлении до 16 атм, который использовался в качестве высоковольтного коммутатора сильноточного наносекундного ускорителя электронов СИНУС – 6 (см. рисунок 12). Продувка газа осуществлялась поперек канала пробоя. Разрядник коммутировал 50 - омную формирующую линию с электрической длиной 10 нс на согласованную нагрузку. Время нарастания напряжения на электродах до пробоя составляло порядка 25 мкс. Долговременный импульсно-периодический режим реализован при рабочем напряжении от 100 до 680 кВ и частоте повторения вплоть до 270 Гц с отклонением импульсного пробивного напряжения от среднего значения менее 1%.

Для обеспечения стабильности срабатывания разрядника по напряжению необходимо обеспечить воспроизводимость условий развития пробоя от импульса к импульсу. Одной из причин нестабильности срабатывания по напряжению является нестабильность по времени возникновения инициирующих электронов в промежутке.



1 - формирующая линия, 2 - низковольтная обмотка импульсного трансформатора, 3 - высоковольтная обмотка импульсного трансформатора, 4 - передающая линия, 5 - газовый разрядник, 6 - система продувки газа через разрядник, 7 - вакуумный диод; Т- тиристор, U_1 и U_2 - емкостные датчики

Рисунок 12 - Схема наносекундного генератора СИНУС-6 [8]

Начиная с некоторого значения частоты следования импульсов, на пробивное напряжение будут влиять газодинамические возмущения, продукты эрозии электродов и остаточная плазма, которые остаются в промежутке после предшествующего импульса. Это влияние можно устранить продувкой газа через промежуток. При отсутствии принудительной продувки газа при интерпретации результатов следует учитывать, что смена газа в зазоре фактически осуществляется за счет конвекционного потока.

Применение продувки газа через разрядник позволяет удалять продукты предшествующего разряда из межэлектродного промежутка к моменту прихода последующего импульса на промежуток. На рисунке 13, а представлены результаты измерений зависимостей $U_{br}(f)$ и $\delta(f)$ для скорости продувки газа $v = 8,2$ м/с.

С ростом частоты в довольно широком диапазоне (от 25 до 100 Гц) наблюдается стабильная работа разрядника со среднеквадратичным отклонением меньше 1%. В этом случае предшествующий разряд уже оказывает влияние на статистику возникновения иницирующих электронов при последующем пробое, но газодинамические возмущения, возникающие в промежутке от предшествующего пробоя, все еще не играют роли.

Дальнейшее повышение частоты следования импульсов приводит к сильному увеличению δ и снижению импульсного пробивного напряжения.

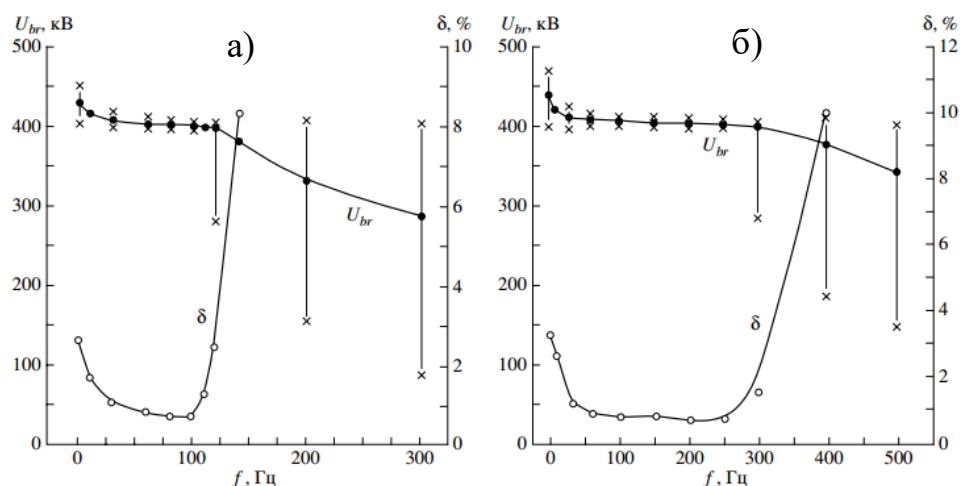


Рисунок 13 - Импульсное пробивное напряжение разрядника U_{br} и среднеквадратичное отклонение δ пробивного напряжения в зависимости от частоты следования импульсов при давлении газа в разряднике $p = 5$ атм и скорости принудительной продувки газа $v = 8,2$ м/с (а) и $20,5$ м/с (б) [8]

На рисунке 13, б показаны зависимости $U_{br}(f)$ и $\delta(f)$ при скорости продувки газа $20,5$ м/с. Диапазон частот, в которых разрядник работает стабильно, увеличился [8].

1.2.8 Тиратрон

Тиратроны относятся к газонаполненным ключевым приборам. Однако рабочее давление газа в тиратронах значительно ниже, чем в газовых разрядниках, и в них используется триодная конфигурация (см. рисунок 14, б)

В большинстве тиратронов используется водород при давлении $30 \dots 80$ Па. В отличие от электровакуумных приборов при работе в тиратронах образуется плазма, что позволяет пропускать большие токи без существенного износа электродов [9].

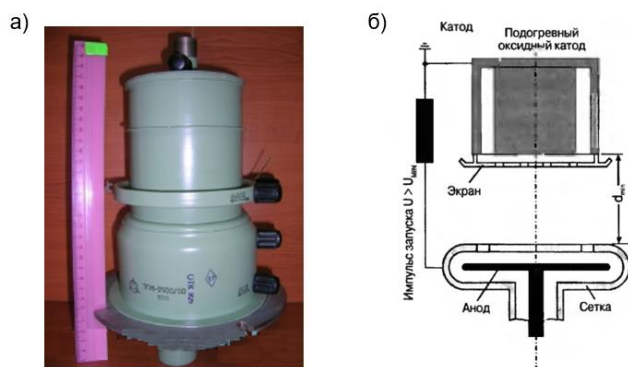


Рисунок 14 – Внешний вид тиратрона с термокатодом (а) и его конструкция (б) [9]

Рабочая область тиратронов лежит слева от минимума кривой Пашена (см. рисунок 15).

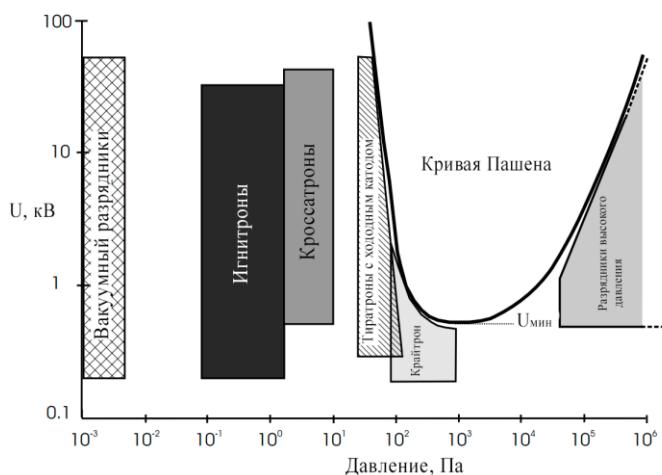


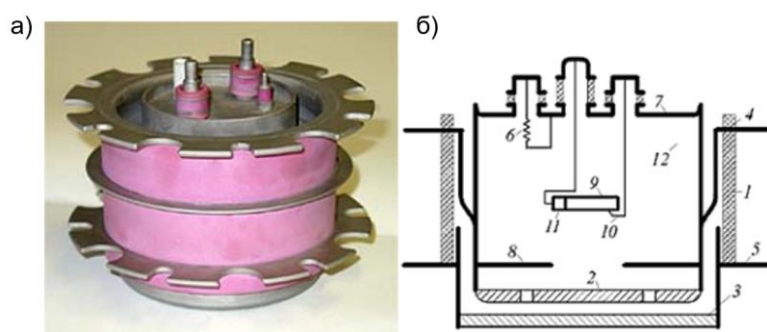
Рисунок 15 - Диапазоны давлений газа и рабочих напряжений различных типов газоразрядных ключей [6]

Диапазон рабочих напряжений тиратронов составляет обычно несколько десятков киловольт. После зажигания разряда падение напряжения на тиратроне составляет около 100 В. Таким образом, на тиратроне происходит выделение заметной мощности, что вынуждает принимать меры к его охлаждению. Тиратроны обеспечивают задержку включения порядка 200 нс и ее нестабильность порядка нескольких наносекунд.

Характеристики серийно выпускаемых тиратронов представлены в таблице Б.1 (см. приложение Б)[10].

1.2.9 Тиратрон с холодным катодом

Подобно обычным тиратронам, тиратроны с холодным катодом - псевдоискровой разрядник (см. рисунок 16) работают в режиме низкого давления и при высоких значениях E/p . В этом режиме средний свободный пробег электронов и ионов сопоставим с межэлектродными расстояниями. Таким образом, большая часть электронов достигает анода без ионизационных столкновений в газе.



1 – керамический корпус, 2 – катод, 3 – анод, 4 – катодный фланец, 5 – анодный фланец, 6 – генератор водорода, 7 – верхний фланец, 8 – экран, 9-11 – узел поджига, 12 – катодная полость

Рисунок 16 - Внешний вид (а) и схема псевдоискрового разрядника ТДИ-150к/25 (б) [11]

Характеристики некоторых моделей тиратронов представлены в таблице Б.2 (см. приложение Б).

1.2.10 Вакуумный разрядник

Управляемые вакуумные разрядники являются трехэлектродными приборами и работают при давлении внутри корпуса 0,001 Па (см. рисунок 17).

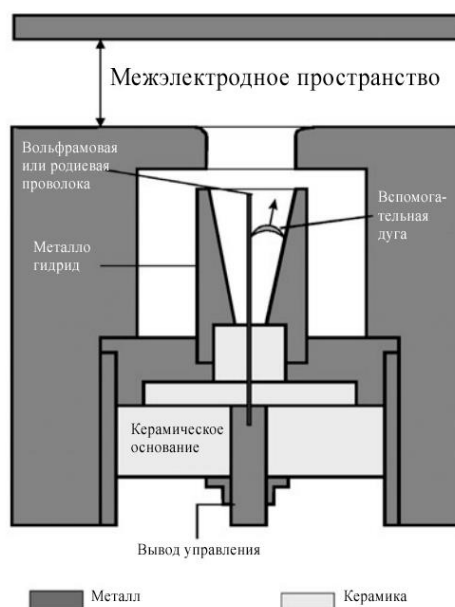


Рисунок 17 – Управляемый вакуумный разрядник в разрезе [6]

Их включение осуществляется путем инжекции облака плазмы. Максимальное рабочее напряжение зависит только от материала поверхностей электродов. При напряжении до 100 кВ они могут пропускать ток до 10 кА. При надлежащем охлаждении они способны работать на частоте до нескольких килогерц [6].

Характеристики некоторых управляемых вакуумных разрядников представлены в таблице Б.3 (см. приложение Б).

1.3 Характеристики искровых газонаполненных коммутаторов, возможности и ограничения

1.3.1 Основные характеристики

Область применения коммутаторов различных типов определяется их характеристиками. Любая технология (электроразрядное разрушение, ускорительная техника, получение нанопорошков) накладывает определенные требования к коммутаторам:

- 1) диапазон рабочих напряжений, кВ;
- 2) величина коммутируемого тока импульса, А;

- 3) долговременный средний ток коммутации, А;
- 4) время задержки - фактическое время между приложением переключающего импульса и началом проводимости между главными электродами коммутатора;
- 5) время коммутации является временем от начала проводящего состояния между контактами (конец времени задержки) до максимальной проводимости.
- 6) разброс времени коммутации;
- 7) время восстановления электрической прочности после коммутации;
- 8) срок службы (число коммутаций на максимальном токе);
- 9) частота коммутаций;
- 10) потери мощности;
- 11) статическое и динамическое напряжение пробоя;
- 12) потенциал погасания разряда.

Характеристики серийных коммутаторов представлены в паспортных данных устройства. Технические данные для некоторых газовых управляемых разрядников типа РГУ технические данные представлены на таблице Б.4 (см. приложение Б).

1.3.2 Время запаздывания срабатывания разрядника

Одной из важнейших характеристик разрядников является время запаздывания срабатывания (время зажигания разряда), которое обуславливается процессами инициирования и развития разряда в коммутатора. Запаздывание срабатывания управляемых разрядников τ_3 определяется как интервал времени от подачи высоковольтного управляющего импульса до резкого нарастания тока в основном промежутке.

Как известно [14] время запаздывания срабатывания разрядника складывается из двух составляющих: времени запаздывания зажигания τ_3 и времени формирования разряда τ_ϕ . Но при давлении выше $133 \cdot 10^2$ Па время

формирования на несколько порядков меньше времени запаздывания и им можно пренебречь [14].

Время запаздывания зависит от условий эксплуатации и конструкции разрядника. Большой вклад этот параметр вносит в динамическое напряжение пробоя, которое приобретает большее значение при эксплуатации искровых разрядников, чем статическое напряжение пробоя.

Динамическое напряжение пробоя определяется формулой [14]:

$$U_{\text{дин}} = U_{\text{ст}} + \tau_z \cdot \left(\frac{dU}{dt} \right) \quad (1)$$

Из (1) следует, что динамическое напряжение пробоя всегда больше статического на величину $\tau_z(dU/dt)$.

Время запаздывания срабатывания разрядника, а также среднее квадратическое отклонение этого времени σ должны быть достаточно малыми. Как правило, t_z и σ зависят от рабочего напряжения и потому разрядники характеризуются рабочим диапазоном напряжения (от максимального до минимального) ($U_{0\text{макс}} - U_{0\text{мин}}$) в котором τ_z и σ малы и удовлетворяют условиям работы [15].

Разрядники в сжатом газе при давлениях от 1 до 100 атм, которые предназначены для коммутации небольших, в десятки килоампер, токов при напряжении до 50 кВ и работают при перенапряжении на основном промежутке, имеют времена запаздывания около $3 \cdot 10^{-8}$ с при разбросе менее $1 \cdot 10^{-8}$ с. Весьма малые значения запаздывания имеют и разрядники в сжатом газе (азот) на относительно небольшие токи (до 10^5 А) [16].

Большой интерес представляют разрядники в сжатом газе ($p_0 = 4-7$ атм) с иницированием на принципе «искажения поля» [15]. Иницирование в них осуществляется путем подачи поджигающего импульса напряжения 50 кВ с фронтом (10–30) нс на управляющий электрод, совпадающий своим профилем с эквипотенциальными линиями поля между основными электродами. Резкое искажение поля приводит к пробую основного промежутка с запаздыванием 30 нс и разбросом 5 нс. Разрядники этого типа имели индуктивность около 60

нгн и коммутировали многократно токи до 200 кА при рабочем напряжении до 100 кВ и частоте (200–500) кГц.

Характеристики некоторых разрядников атмосферного и повышенного давления приведены в таблице Б.5 (см. приложения Б) [15].

1.4 Факторы, влияющие на стабильность характеристик искровых газонаполненных коммутаторов

1.4.1 Эрозия электродов при коммутации больших импульсных токов

Многократное (10^5) протекание больших импульсных токов (около 10^5 А) через разрядник может вызвать значительную эрозию электродов разрядника, что приводит к изменению его характеристик [13]. Снижается статическое разрядное напряжение и ухудшаются вольтсекундные характеристики, представляющие собой зависимость времени запаздывания срабатывания разрядника от напряжения на нем.

Если положить, что приэлектроднос падение напряжения U , постоянно, то энергия, поступающая на единицу поверхности электрода, будет пропорциональна протекающему через канал за время разряда t_p количеству электричества

$$q = \int_0^{t_p} |i(t)| dt \quad (2)$$

Величина эрозии зависит от теплофизических свойств материала (теплоемкости, теплопроводности, температуры плавления и испарения, скрытой теплоты плавления и парообразования) и пропорциональна выделившейся энергии, а следовательно, величине количества электричества.

Как показали экспериментальные исследования [17], проведенные с медными молибденовыми и титановыми электродами (установленными на расстоянии 1,5 мм) при колебательных разрядах длительностью до нескольких

сот микросекунд, зависимость эрозии электродов от протекающего количества электричества близка к линейной (см. рисунок 18).

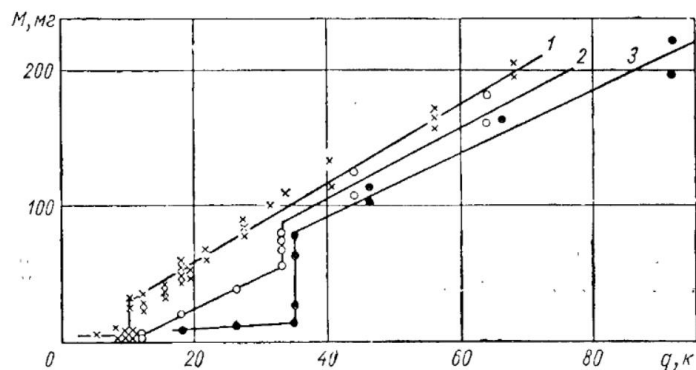


Рисунок 18 – Величина массы эродированного с электродов металла от величины q для меди (1), молибдена (2), титана (3) [15]

Отклонение от линейной зависимости наблюдается при малых количествах электричества, так называемом пороговом значении, когда эрозия уменьшается скачком. В допороговой области q преобладает эрозия в результате испарения. Такой режим соответствует токам в десятки килоампер.

При значительно больших токах и величине q выше пороговой эрозия возрастает и преобладает выброс металла в жидком виде. Для разрядников, которые работают при напряжении, близком к статическому разрядному, необходимо использовать допороговый режим, т. е. работать при малых величинах q (не более нескольких кулонов).

Известно, что температура канала искры в воздухе может достигать десятков тысяч градусов при плотности тока 10^5 А/см² [18, 19], в связи с чем невозможно полностью избежать эрозии поверхностей электродов разрядника, контактирующих с разрядным каналом. Однако если использовать электроды из определенных материалов и не пропускать через разрядники токов выше допустимых, то можно значительно продлить срок службы электродов.

В [17] приводятся данные по эрозии электродов с полусферическими концами (диаметр стержня 7 мм). Через два последовательно включенных

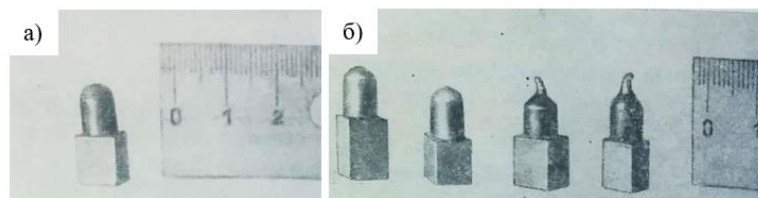
искровых промежутка длиной 20 мм каждый, образованных двумя парами электродов, разряжался небольшой генератор импульсных токов (ГИТ) на рабочее напряжение 150 кВ с запасаемой энергией около 12 кДж и максимальным током в разряде 46 кА. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 - результаты испытания электродов [17]

Материал электродов	N	Изменение массы образцов			Δm , мг/разряд	ΔV , мм ³ /разряд	Состояние поверхности
		№1	№2	Сред.			
Латунь	100	-70	-30	-50	0,5	0,06	После 75 разрядов образовался небольшой конус на конце электрода, который затем стал увеличиваться.
Ст.3	100	-65	-75	-70	0,7	0,09	То же, что и у латуни, но уже после 30 разрядов.
Молибден	100	-15	-40	-28	0,28	0,03	На конце стержня образовались небольшие наплывы и появилось острие.
Вольфрам	100	-35	-55	-45	0,45	0,02	На конце электрода образовался небольшой конусообразный выступ.
Кирит	200	-80	-80	-80	0,4	0,02	Никаких заметных изменений
ЭИ-69	25	-15	-	-48	1,9	0,25	Уже после 3-5 разрядов форма электродов искажилась. После 25 разрядов электроды имели наплывы и острые выступы.
ЭИ-283	25	-95	-35	-65	2,6	0,32	
Х-1	100	-	-	-280	2,8	0,35	

В таблице Δm – убыль массы электрода за один разряд, ΔV – уменьшение объема электрода за один разряд, определяемое как отношение убыли массы электрода за один разряд к удельному весу материала электрода, N – число разрядов.

Об изменении формы электродов в результате разрядов можно судить по фотографиям электродов до испытаний и после (см. рисунок 19).



а) – до испытаний; б) – после испытаний (слева направо: электроды из вольфрама, кирита, Х-1, Ст.3)

Рисунок 19 – Фотографии образцов [17]

Для количественной оценки эрозии электродов в специальной литературе по контактам используется отношение объема потерянного материала контактов или электродов к произведению действующего значения тока на время существования дуги, $\text{см}^3 / (\text{kA} \cdot \text{с})$ (удельная эрозия) [20] .

Зависимость удельной эрозии от процентного содержания тугоплавкой составляющей для металлокерамических контактов представлена на рисунке 20.

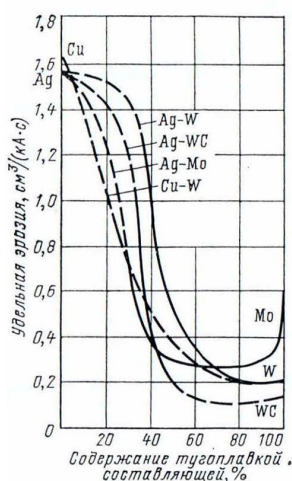


Рисунок 20 – Зависимость объема эродированного материала за цикл разряда от процентного содержания тугоплавкой составляющей в металлокерамических контактах [20]

Следует отметить, что зависимость, представленная на рисунке, были получены в испытаниях при токе 20 - 25 кА (амплитудное значение) и при расстоянии между электродами от 0,4 до 12 мм.

1.4.2 Повышенные температуры электродов в зоне разряда

Температура канала воздушной искры может достигать $3 \cdot 10^4$ К, в атмосфере азота $4,3 \cdot 10^4$ К, что является причиной повышения температуры электродов. Объяснить различие температур можно охлаждающим влиянием кислорода, энергия ионизации которого меньше, чем у азота [19]. Авторами [21] приводятся следующие температурные факторы, влияющие на скорость восстановления электрической прочности воздушного промежутка:

1 При нагреве электродов промежутка до 1600 °К пробивное напряжение воздуха при нормальном давлении снижается. При этом локальная температура той части поверхности электродов, где находились опорные пятна дуги, снижается примерно в 10 раз медленнее, чем требуется для обеспечения необходимой величины электрической прочности, при которой межэлектродный промежуток мог бы уверенно выдержать восстанавливающееся напряжение.

2 Электрическая прочность воздуха снижается вдвое уже при нагреве его до 3000 ° К, а так как температура столба дуги может достигать при больших токах $20\ 000$ ° К, то вполне возможно, что в промежутке после разряда частично остается газ, нагретый до температур более высоких, чем $3\ 000$ ° К.

3 Если межэлектродное расстояние невелико, дуга горит в среде, состоящей из смеси разогретых частиц воздуха с парами материала электродов. При токах дуги выше $1\ 000$ А дуга горит практически лишь в парах материала электродов. Это приводит к уменьшению электрической прочности промежутка, так как потенциал ионизации атомов металлов значительно ниже, чем у газов.

1.5 Методы и подходы уменьшения влияния дестабилизирующих факторов

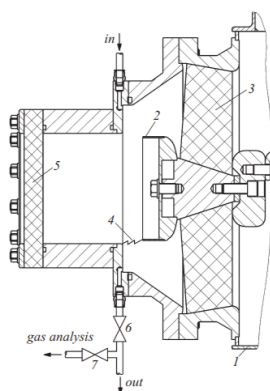
Нестабильность работы разрядника может быть обусловлена множеством факторов. Например, при высокой частоте следования импульсов

причиной разброса и снижения пробивного напряжения являются газодинамические возмущения, не распавшаяся полностью плазма от предыдущего разряда и изменение химического состава газа.

Для снижения дестабилизирующих факторов при проектировании разрядника применяются различные способы. Хороший эффект достигается при принудительной продувке газа. Основные проблемы, возникающие здесь: выбор межэлектродной конфигурации и подбор скорости прокачки [22].

1.5.1 Постоянное или периодическое обновление газа

Эффективность продувки газом была доказана экспериментально [23]. Рабочая среда разрядника (см. рисунок 21) в экспериментах была наполнена азотом, смесью азота с CO_2 и осушенным воздухом.



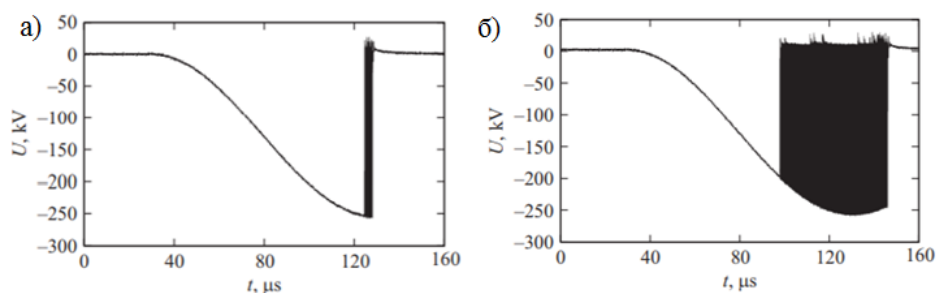
1 – стенка бака, заполненного трансформаторным маслом; 2 – катод разрядника; 3 – проходной изолятор; 4 – схематичное изображение канала разряда; 5 – окно для наблюдения разряда; 6 – вентиль для регулирования потока газа; 7 – вентиль для подачи газа в систему химического анализа

Рисунок 21 - Схематичный чертеж разрядника [23]

На рисунке 22 представлены наложенные осциллограммы импульсов напряжения при работе разрядника. Частота следования импульсов составлял $f = 5$ Гц при давлении $p = 4,6$ атм, продувки газа отсутствовала. Можно заметить, что в течение приблизительно одной минуты наблюдается хорошая

стабильность срабатывания разрядника. Разброс по времени срабатывания не превышает 5 мкс.

Увеличение времени работы до 2-3 минут приводит к нагреву газа. Это приводит к нагреву стенки разрядника и повышению давления, изменение значения которого можно увидеть на манометре. Повышение давления происходит в промежутке от $p = 4,6$ атм до $p = 5$ атм. При этом заметно возрастание разброса срабатывания разрядника по времени и напряжению. Разброс становится большим при числе импульсов приблизительно равным 1000 (около трех минут непрерывной работы разрядника). Этот факт можно увидеть на осциллограмме (см. рисунок 22, б). Из-за наработки двуокиси азота в камере газ в разряднике постепенно мутнеет и приобретает желтый.



а — серия импульсов после одной минуты работы разрядника; б — серия импульсов после трех минут работы

Рисунок 22 - Осциллограммы напряжения на промежутке при одновременном наложении 65 импульсов, показывающие разброс срабатывания разрядника [23]

На кривых (см. рисунок 23) показаны зависимости концентраций NO и NO₂ от количества импульсов N. При этом $P = 4,6$ атм, $f = 5$ Гц, продувки воздуха через разрядник не производится.

Разбросы пробивных напряжений можно заметить, когда количество импульсов достигает $N = 1000$. В этом случае содержание окислов азота в воздухе составляет: NO приблизительно $1,2$ г/м³ и NO₂ - $2,5$ г/м³. Изменение содержания кислорода незначительно: в исходной смеси концентрация

кислорода составляет 20,9%, а при числе импульсов $N = 1500$ она уменьшается до 20,5%. По кривым (см. рисунок 23, а) видно содержание NO возрастает фактически линейно при увеличении количества импульсов во всем диапазоне N .

В экспериментах также проводилось исследование режима непрерывной продувки газа через разрядник. Результаты измерений содержания окислов азота представлен на рисунке 23, б. Условия эксперимента: $P = 4,6$ атм, $f = 5$ Гц.

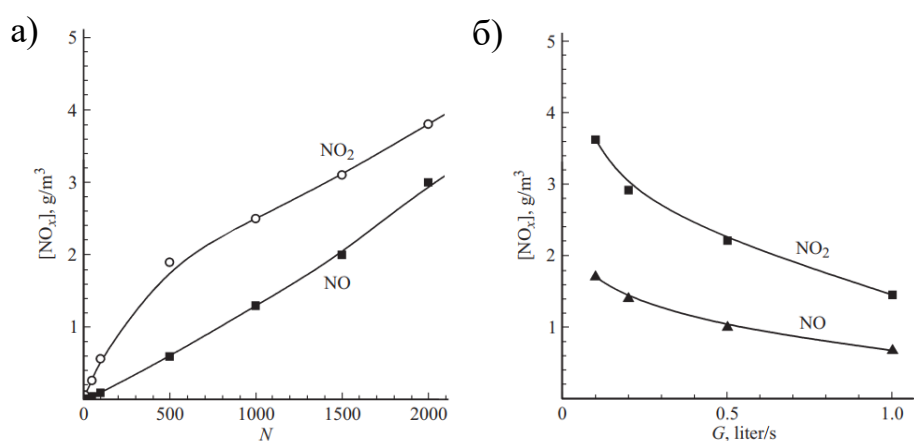
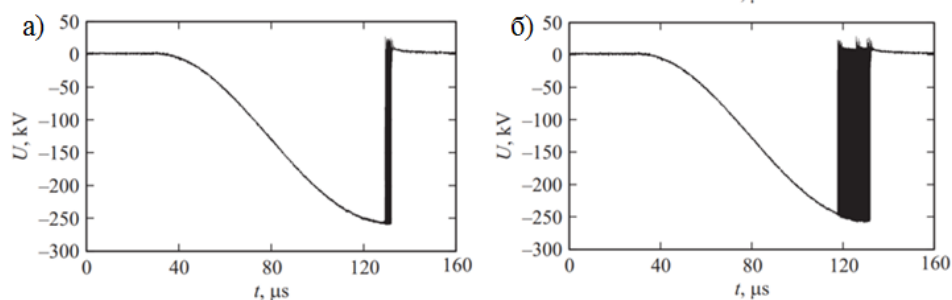


Рисунок 23 – Зависимость концентрации NO и NO₂ в разряднике от количества поданных импульсов (а) и от потока воздуха (б) [23]

Из графика (см. рисунок 23, б) следует, что при уменьшении потока газа через разрядник концентрация NO в смеси возрастает, что приводит к ухудшению стабильности срабатывания разрядника. Это подтверждается осциллограммами напряжения, представленными на рисунке 24.

Было установлено, что при потоке $G \approx 0,2$ л/с разброс срабатывания разрядника еще не значительный. Но при дальнейшем снижении G ведет разброс увеличивается, и осциллограмма приобретает вид, схожий с показанной на рисунке 24, б.



а — $G = 1$ л/с, б — $G = 0,2$ л/с. $p = 4,6$ атм, $f = 5$ Гц.

Рисунок 24 - Осциллограммы напряжения на промежутке при одновременном наложении 65 импульсов [23]

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что для стабильной работы разрядника в непрерывном режиме нужно обеспечить непрерывную продувку газа через разрядник.

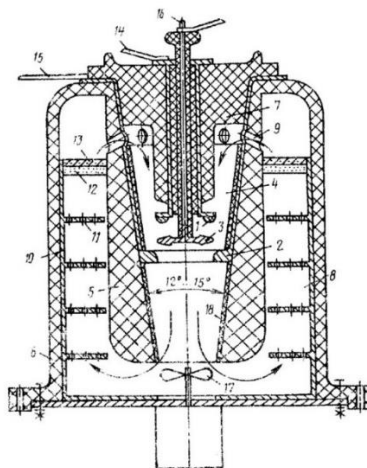
1.5.2 Фильтрация газа

Еще одним способом улучшения стабильности срабатывания разрядника является очистка заполняющего газа от механических примесей и продуктов разложения от разряда. Один из вариантов исполнения данного способа используется в разряднике (см. рисунок 25) [24].

Принцип работы разрядника заключается в следующем. Корпус заполняется рабочей газовой средой до требуемого давления. Включается напорный элемент 17, обеспечивающий принудительную циркуляцию в замкнутом контуре газа из разрядной камеры 4 в расширительную камеру 8 и опять в разрядную и т.д. При подаче на электрод 3 импульса управляющего напряжения пробивается промежуток между электродами 1 и 2.

Под воздействием протекающего тока происходит нагрев газа как в канале разряда, так и в разрядном объеме за счет излучения из канала и теплопроводности. Под действием принудительной циркуляции, создаваемой напорным элементом 17, нагретый газ вместе со взвешенными в газе продуктами эрозии электродов и остаточными продуктами разложения газа

поступает в расширительную камеру 8. При этом принудительная циркуляция газа и конусообразная внутренняя поверхность разрядной камеры 4, снижающая сопротивление потоку газа, обеспечивают полную смену газа в разрядном промежутке.



1, 2 – основные электроды; 3 – поджигающий электрод; 4 – разрядная камера; 5 – конический раструб корпуса; 6 – цилиндрический стакан корпуса; 7 – торцевая крышка; 8 – расширительная камера; 9 – радиальные сквозные отверстия; 10 – съемный стакан; 11 – перфорированные ребра; 12, 13 – фильтрующие элементы; 14-16 – выводы, 17 – напорный элемент (вентилятор); 18 – термостойкая керамика

Рисунок 25 – Разрядник с системой фильтрации газа [24]

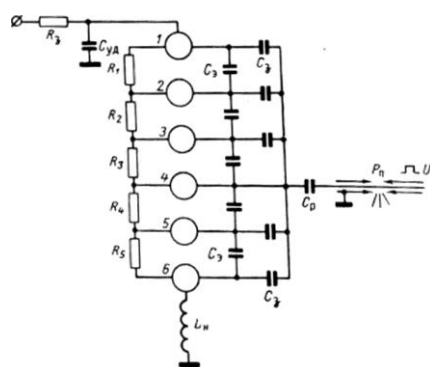
Одновременно движущийся газ очищает поверхности электродов и стенки камеры 4. Направление движения газа показано на чертеже стрелками. По мере прохождения газа в расширительной камере 8 через перфорированные ребра 11 он остывает, а взвешенные частицы осаждаются на ребрах 11 и между ребрами на стенках съемного стакана 10. Кроме того, перфорированные ребра 11 снижают уровень шума работающего разрядника. Окончательную очистку газа от взвешенных частиц выполняет фильтрующий элемент 12 двухступенчатого поглотителя, а очистку газа от продуктов разложения - фильтрующий элемент 13 поглотителя. Съемный стакан 10 с ребрами 11 позволяет через определенное число включений разрядника

снимать его и чистить или заменять другим, а также обеспечивает смену двухступенчатого поглотителя. При этом отпадает необходимость в чистке внутренней поверхности самой расширительной камеры 8, которая остается практически чистой.

1.5.3 Теплоотвод от электродов частотных газонаполненных искровых коммутаторов

Выбор способа реализации теплоотвода должен осуществляться с учетом преимуществ и недостатков с различных точек зрения: конструктивных особенностей, эффективности теплоотвода, надежности, себестоимости и пр.

Температурные факторы, снижающие скорость восстановления электрической прочности межэлектродного промежутка, указанные в п.1.4.2, можно устранить способами, предложенными авторами [25] для искрового многозачорного разрядника (см. рисунок 26).



$R_з$ – защитное сопротивление; $C_{уд}$ – ударная емкость; $R_п$ – искровой промежуток для подсветки, $U_п$ – пусковой импульс; $C_з$ – емкость электродов на землю; $C_э$ – межэлектродная емкость, C_p – разделительная емкость, R_1-R_5 - активный делитель; $L_п$ – индуктивность нагрузки; 1-6 – электроды

Рисунок 26 – Искровой многозачорный разрядник [25]

Первый фактор можно устранить, используя водяное охлаждение электродов. Разрядника и их вращение для устранения возможности

появления локально перегретых участков и достижения равномерного износа электродов. Второй и третий устраняются продувкой воздуха через промежутки со скоростью не менее 15 м/сек. На рисунке 27 приведена механическая схема разрядника, сконструированного с учетом этих соображений. На латунные трубки диаметром 18 мм посажены электроды из нержавеющей стали диаметром 27 мм и длиной 50 мм.

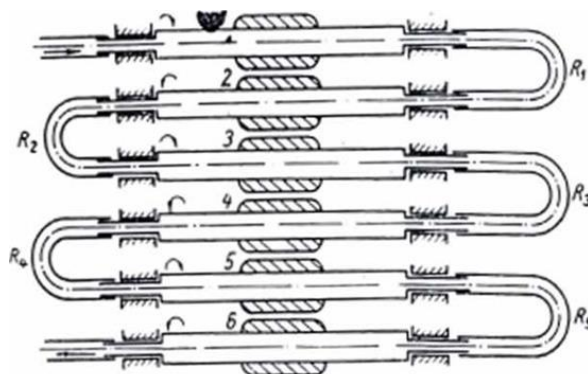


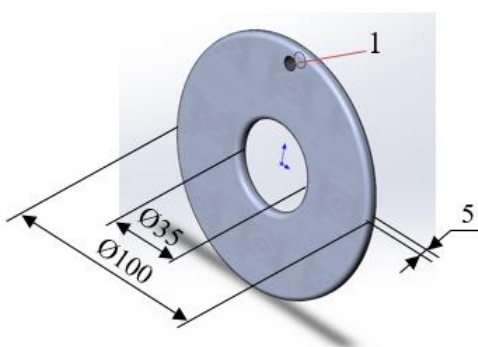
Рисунок 27 – Система охлаждения многозазорного разрядника [25]

Все зазоры разрядника продуваются воздухом со скоростью примерно 30 м/сек. Длина каждого зазора разрядника составляет по 1,5 мм. Нижний предел рабочего напряжения такого разрядника составляет 6 кВ, верхний — 30 кВ. Разрядник испытывался при работе его в первичной цепи резонансного трансформатора с волновым сопротивлением 2 Ом. Конденсатор заряжался до напряжения 20 кВ, и ток через разрядник составлял 10 кА. Без продувки воздухом дуга привязывается к одному месту промежутка и на электродах наблюдается, за счет их вращения, кольцевая эрозия. При продувке воздухом дуга перемещается по всей поверхности электродов, и они изнашиваются равномерно. После 10^7 разрядов с частотой их следования 250 Гц нижний предел рабочего напряжения не изменился.

2 Проектирование разрядника

2.1 Моделирование конструкции разрядника

На основе анализа литературы был выбран вариант разрядника с управлением за счет искажения поля между электродами. Такой вариант исполнения позволяет управлять моментом срабатывания основных разрядников. Искажение поля осуществляется при подаче поджигающего импульса на дополнительный электрод, имеющий дисковидную форму (см. рисунок 28)

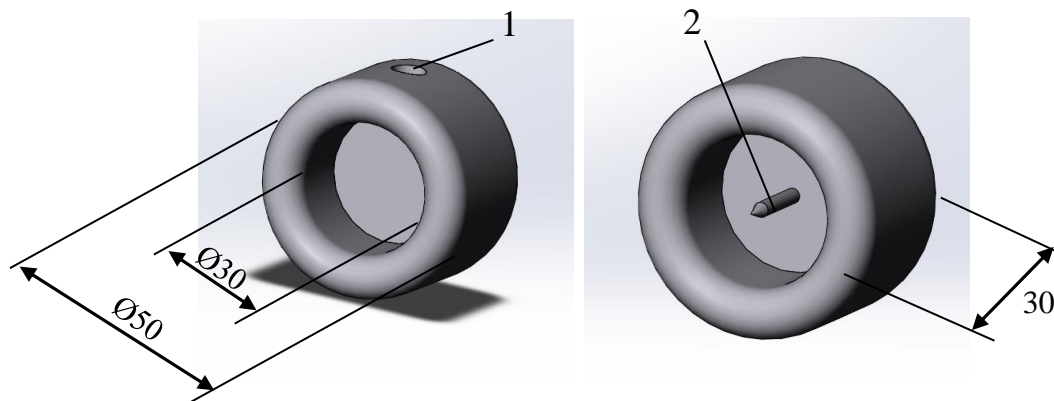


1 – отверстие для крепления

Рисунок 28 – Модель поджигающего электрода

Форма основных электродов - тороидальная, выбиралась исходя из наибольшего ресурса работы разрядника. На одном из электродов установлено острие для предварительной ионизации разрядного промежутка, что позволяет уменьшить время запаздывания срабатывания разрядника. Это позволит обеспечить более стабильную работу разрядника. Модели основных электродов представлены на рисунке 29.

Разрядная камера представляет собой трубу из полипропилена. Конструкция камеры и система электродов повторяет первый разрядный промежуток генератора импульсных напряжений. Назначение камеры – проведение испытаний разрядников на ресурс.



1 – Отверстие для установки электродов; 2 – Острие для предыонизации
разрядного промежутка

Рисунок 29 – Модель основного электрода

Предыонизация разрядного промежутка осуществляется с помощью коронного разряда, который возникает у острия, где находится область с максимальной напряженности электрического поля (см. рисунок 30)

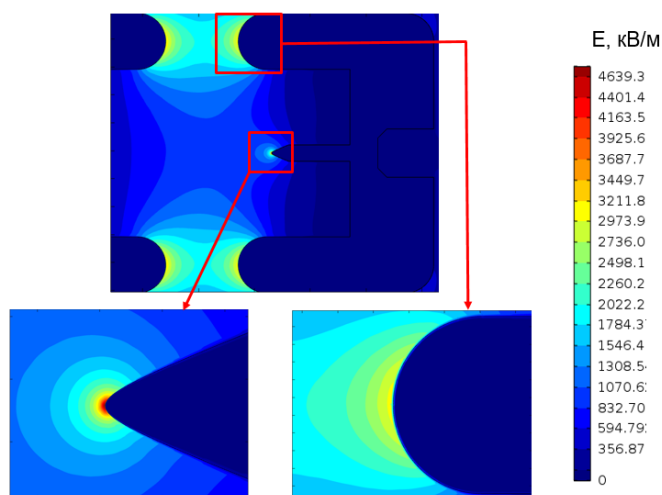
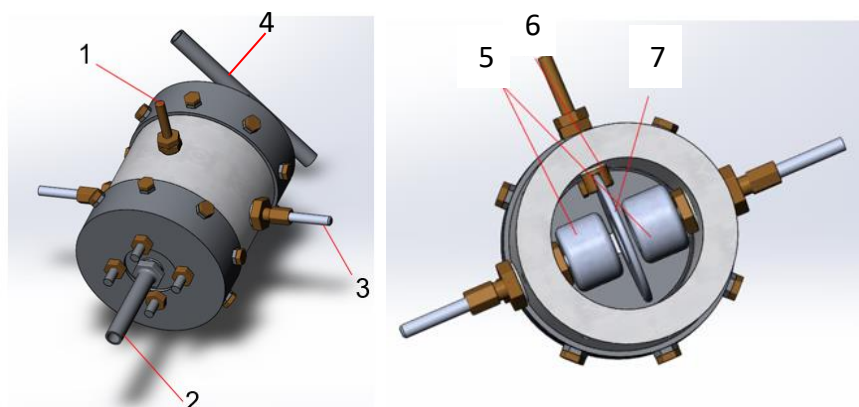


Рисунок 30 – Модель распределения напряженности
электрического поля

Помещение электродной системы в камеру под давлением позволяет уменьшить потери в генераторе и увеличить тем самым долю энергии, передаваемую в нагрузку. Для снижения температуры электродов в камере осуществляется прокачка газа перпендикулярно каналу пробоя. Модель

разрядной камеры, спроектированной в программной среде SolidWorks 2017 представлена на рисунке 31.



1 – держатель поджигающего электрода; 2 – выходная труба для вывода газа; 3 – арматура основных электродов; 4 – труба для ввода газа в разрядную камеру и измерения давления; 5 – основные электроды; 6 – держатель поджигающего электрода; 7 – поджигающий электрод

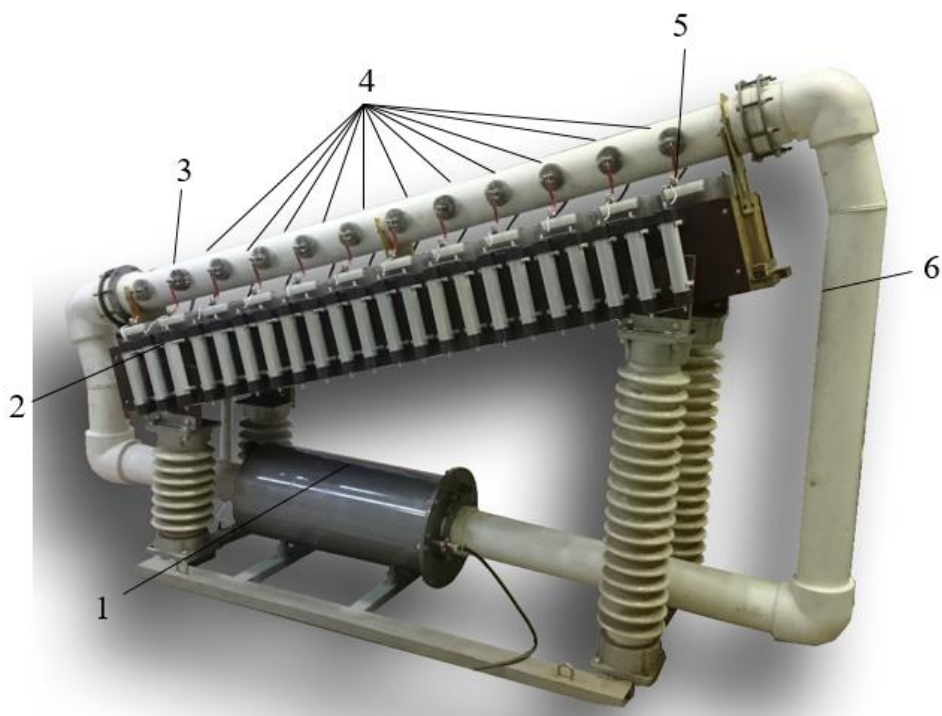
Рисунок 31 - Модель разрядной камеры

Основные размеры камеры: длина – $l = 220$ мм, наружный диаметр $D = 160$ мм, внутренний диаметр $d = 110$ мм.

Конструкция разрядника полностью повторяет первый межэлектродный промежуток существующего генератора импульсных напряжений, предназначенного для электроимпульсного бурения (см. рисунок 32).

ГИН представляет собой одиннадцать разрядников, работающих на самопробое и одним (первым) управляемым разрядником с иницированием на принципе «искажения поля». Материал электродов – нержавеющая сталь марки 12X18Н10Т. Все разрядники размещены на одной линии в трубе из полипропилена, в которой находится газ, азот (N_2) под давлением 2-3 атм. Поперек канала разряда осуществляется циркуляция газа, обеспечивающая охлаждение электродов и очистку от продуктов разряда и оставшейся плазмы. Емкость конденсатора ступени $C_k = 0,35$ мкФ (конденсаторы ИК-100/0,35).

При зарядном напряжении 50 кВ максимальное разрядное напряжение составляет 600 кВ. Амплитуда управляющего импульса, подаваемого на дополнительный электрод первого разрядника с генератора импульсов – 50 кВ. Зарядка осуществляется через зарядные катушки индуктивности.

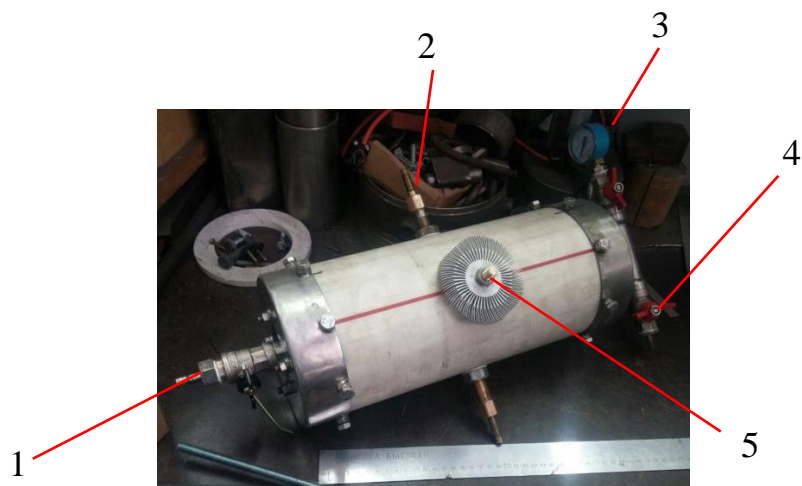


1 – камера системы циркуляции, очистки и охлаждения газа;
2 – зарядная катушка индуктивности; 3 – первый разрядник с иницированием на принципе «искажения поля»; 4 – разрядники, работающие на самопробое; 5 – конденсатор ИК 100 / 0,35; 6 – замкнутый контур системы циркуляции газа

Рисунок 32 – Генератор импульсных напряжений

2.2 Реализация разработанного разрядника

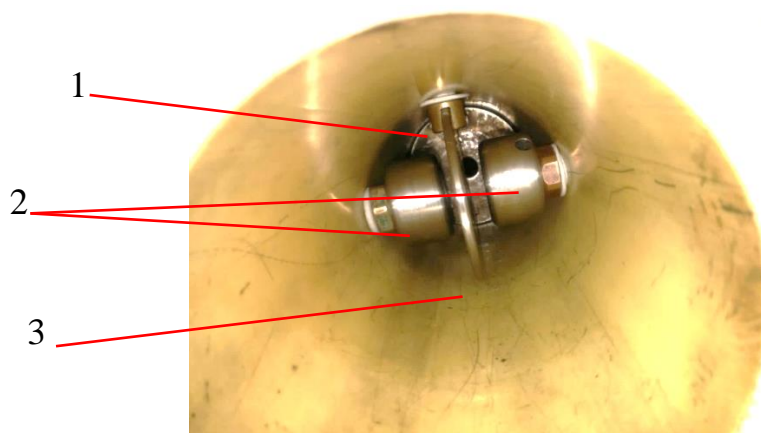
На основе спроектированной модели была собрана разрядная камера (см. рисунок 33, 34)



1 – труба для закачки газа и подключения манометра; 2 – шпилька – держатель основных электродов; 3 – манометр; 4 – труба для вывода газа из камеры; 5 – держатель поджигающего электрода

Рисунок 33 – Разрядная камера

Внутренняя (рабочая) область разрядной камеры представлена на рисунке 34.



1 – держатель поджигающего электрода; 2 – основные электроды;
3 – поджигающий электрод

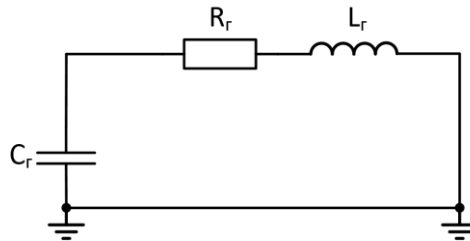
Рисунок 34 – Внутренняя (рабочая) зона разрядной камеры

3 Моделирование тепловых процессов в разрядной камере

3.1 Расчет мощности, выделяемой на одном разрядном промежутке

Рассчитаем тепловую мощность на поверхности электродов.

Определим импеданс генератора импульсных напряжений из осциллограммы режима КЗ. Электрическая схема режима КЗ представлена на рисунке 35.



C_{Γ} – емкость генератора; R_{Γ} – импеданс генератора;

L_{Γ} – индуктивность генератора

Рисунок 35 – Электрическая схема режима КЗ

По осциллограмме режима КЗ (см. рисунок 43), реализованном на генераторе импульсных напряжений (см. рисунок 36).

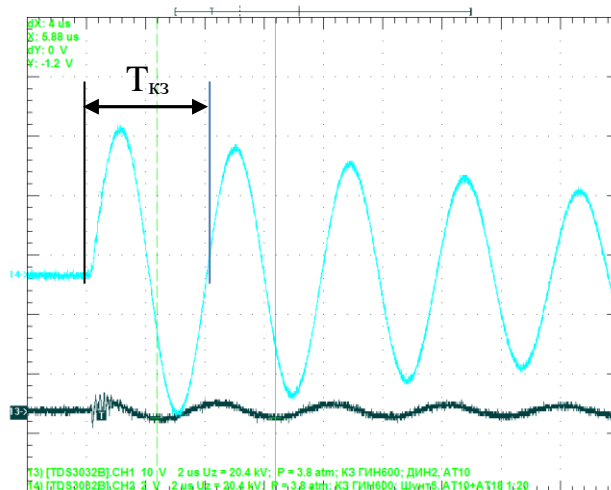


Рисунок 36 – Осциллограмма режима КЗ

По полученной осциллограмме определяем период колебаний $T_{\text{кз}} = 4$ мкс.

Декремент затухания

$$\Delta = \frac{I_1}{I_3}, \quad (3)$$

где I_1 – амплитуда тока первой полуволны

I_3 – амплитуда тока третьей полуволны.

$$\Delta = \frac{I_1}{I_3} = \frac{13}{11} = 1,18$$

Период колебаний, с

$$T_{кз} = 2\pi\sqrt{L_k \cdot C_\Gamma} + \ln(\Delta), \quad (4)$$

где L_k – индуктивность разрядного контура, Гн

C_Γ – емкость генератора в разряде.

Емкость генератора

$$C_\Gamma = \frac{C_k}{N},$$

где C_k – емкость одного конденсатора, мкФ;

$N = 12$ – количество ступеней ГИН.

$$C_\Gamma = \frac{0,35 \cdot 10^{-6}}{12} = 0,029 \text{ мкФ.}$$

Индуктивность разрядного контура согласно (1)

$$L_\Gamma = \frac{T_{кз}^2}{C_\Gamma \cdot (4\pi^2 + \ln(\Delta)^2)} = \frac{(4 \cdot 10^{-6})^2}{0,029 \cdot 10^{-6} \cdot (4 \cdot \pi^2 + \ln(1,18)^2)} = 13,97 \text{ мкГн.}$$

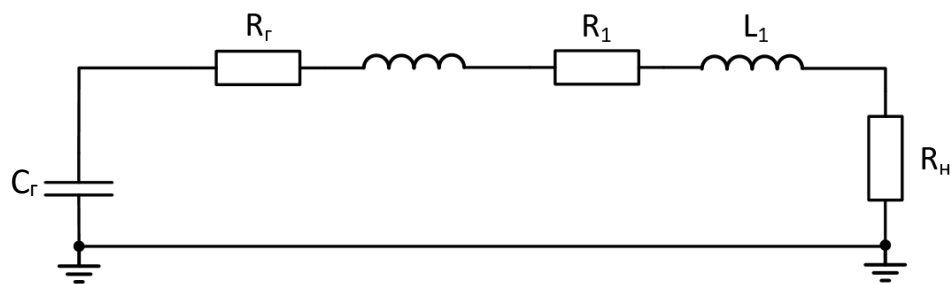
Активное сопротивление генератора, Ом

$$R_\Gamma = \frac{2 \cdot L_k \cdot \ln(\Delta)}{T_{кз}} \quad (5)$$

$$R_\Gamma = \frac{2 \cdot 13,97 \cdot 10^{-6} \cdot \ln(1,18)}{4 \cdot 10^{-6}} = 1,17 \text{ Ом.}$$

Проведем аналогичные расчеты для рабочего режима.

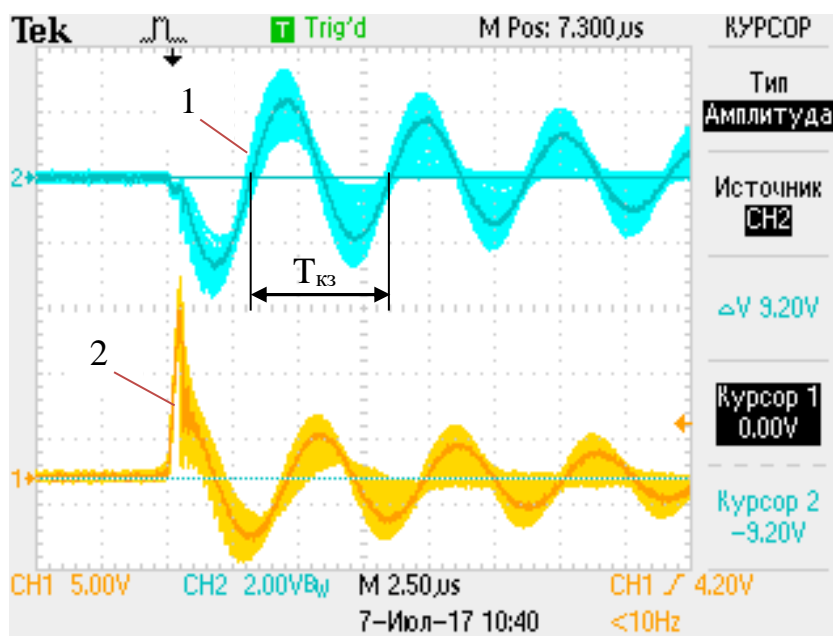
Электрическая схема генератора с нагрузкой представлена на рисунке 37.



C_{Γ} – емкость генератора; R_{Γ} – импеданс генератора; R_1 – сопротивление разрядного контура; L_1 – индуктивность петли подсоединения объекта; R_{H} – сопротивление нагрузки

Рисунок 37 – Электрическая схема рабочего режима генератора

По данным осциллограммы рабочего режима (см. рисунок 38) определим полное сопротивление разрядного контура.



1 – ток; 2 – напряжение;

Рисунок 38 – Осциллограмма рабочего режима

По осциллограмме (см. рисунок 45) определяем период колебаний $T_{\text{кз}} = 5,25$ мкс и декремент затухания

$$\Delta = \frac{I_1}{I_3} = \frac{1,2}{0,8} = 1,5.$$

Индуктивность разрядного контура согласно

$$L_k = \frac{T_{кз}^2}{C_r \cdot (4\pi^2 + \ln(\Delta)^2)} = \frac{(5,25 \cdot 10^{-6})^2}{0,029 \cdot 10^{-6} \cdot (4 \cdot \pi^2 + \ln(1,5)^2)} = 23,5 \text{ мкГн.}$$

Активное сопротивление разрядного контура, Ом

$$R_k = \frac{2 \cdot 29,5 \cdot 10^{-6} \cdot \ln(1,7)}{5,83 \cdot 10^{-6}} = 3,7 \text{ Ом.}$$

Суммарное активное сопротивление нагрузки и петли подсоединения

$$R_2 = R_k - R_r = 3,7 - 1,17 = 2,53.$$

Следовательно, сопротивление нагрузки и петли подсоединения составляет $2,53 \cdot 100 / 3,7 = 68 \%$ от суммарного сопротивления, а сопротивление генератора – 32%.

Энергия в одном импульсе без учета потерь

$$W_{\text{имп}} = \frac{C_r U_{\text{вых}}^2}{2}. \quad (6)$$

где $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение генератора импульсных напряжений, В.

$$U_{\text{вых}} = U_0 \cdot N,$$

где U_0 – зарядное напряжение, В.

Зарядное напряжение составляло $U_0 = 30 \text{ кВ}$.

$$U_{\text{вых}} = 30 \cdot 10^3 \cdot 12 = 360 \text{ кВ.}$$

$$W = \frac{0,029 \cdot 10^{-9} \cdot (360 \cdot 10^3)^2}{2} = 1879 \text{ Дж.}$$

Частота следования импульсов – 10 имп/с. Следовательно, в разрядном контуре каждую секунду выделяется мощность, Вт

$$P_{\text{конт}} = W_{\text{имп}} \cdot f = 1879 \cdot 10 = 18790 \text{ Вт.}$$

Так как, сопротивление генератора составляет 32% от общего, тогда мощность выделенная в генераторе импульсных напряжений составляет

$$P_{\text{гин}} = 18790 \cdot 0,32 = 6012 \text{ Вт.}$$

В генераторе импульсных напряжений 12 разрядных промежутков, следовательно, на каждом разрядном промежутке выделяется мощность

$$P_{1\text{пр}} = \frac{6012}{12} = 501 \text{ Вт.}$$

3.1 Моделирование теплового режима на электродах

Используя рассчитанную мощность тепловыделения на электродах, было проведено моделирование теплового режима в разрядной камере (см. рисунок 39)

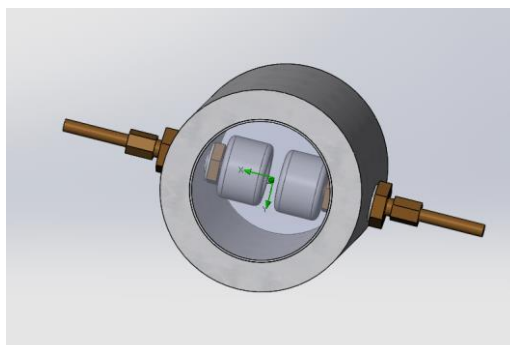


Рисунок 39 – Модель разрядной камеры

К обоим торцам тороидальных электродов на каждую из поверхностей прикладывается тепловая мощность $P_{\text{тпр}} = 250$ Вт.

Было создано 3 варианта модели: без теплосъема, с внешним теплосъемом и с продувкой газа поперек электродной системы.

1) Модель 1

Условия моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Условия моделирования

Объемный расход в камере, м ³ /с	Температура окружающей среды,	Давление окружающей среды, атм	Давление в камере	Скорость внешнего обдува, м/с	Начальная температура газа в камере, °С
0	20	1	2	1	40

Скорость внешнего обдува было выбрана исходя из того, что она соответствует естественной циркуляции воздуха вокруг камеры с разрядниками.

В результате моделирования в программе SolidWorks Flow Simulation 2017 была получена картина распределения температурного поля (см. рисунок 40).

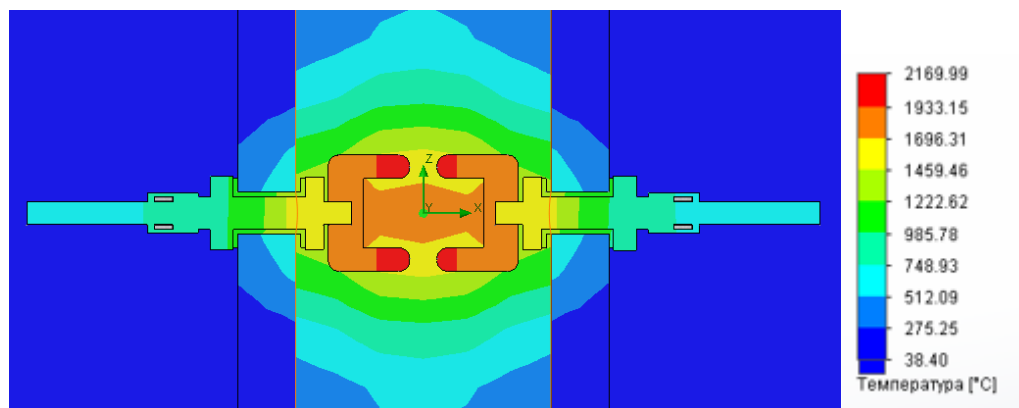


Рисунок 40 – Картина распределения температурного поля модели электродной системы

Максимальная температура электродов составляет $t_1 = 2169,99 \text{ } ^\circ\text{C}$

2) Модель 2

На держатели электродов существующей модели (см. рисунок 39) были установлены алюминиевые радиаторы (см. рисунок 41). Таким образом, осуществляется внешний теплоотвод.

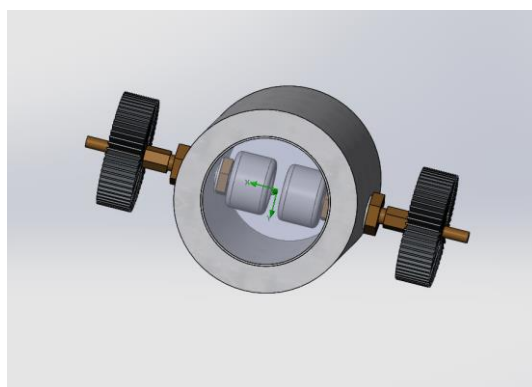


Рисунок 41 – Модель разрядной камеры с радиаторами

Условия моделирования соответствуют таблице 6.

В результате моделирования была получена картина распределения температурного поля (см. рисунок 42)

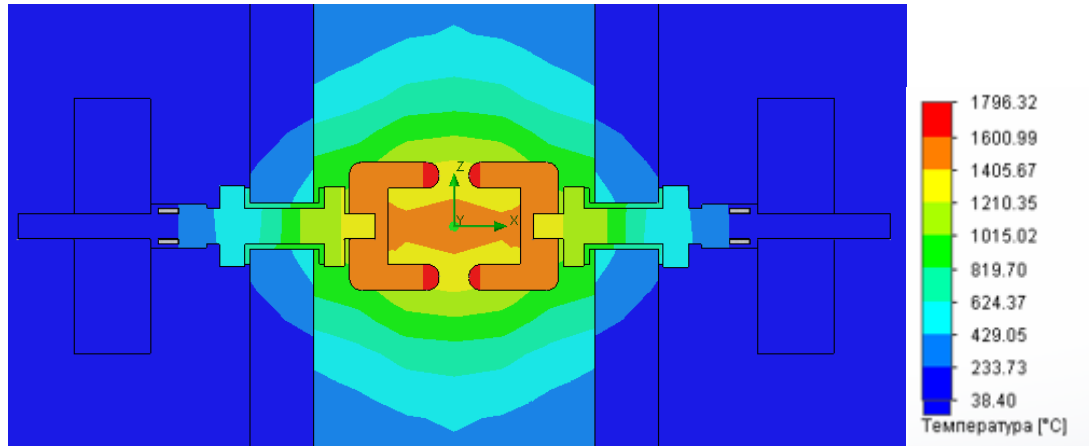


Рисунок 42 – Картина распределения температурного поля модели электродной системы

Максимальная температура составляет $t_2 = 1796,32$ °С.

Внешний теплообмен позволил снизить максимальную температуру на $\Delta t_{12} = 2169,99 - 1796,32 = 373,67$ °С.

3) Модель 3

В [25] для многозазорного разрядника с пределом рабочего напряжения $U_{\text{макс}} = 30$ кВ, током в разряде 10 кА и длиной межэлектродного промежутка $d = 1,5$ мм было установлено, что для снижения факторов, влияющих на снижение электрической прочности межэлектродного, требуется реализовать продувку поперек канала разряда со скоростью не менее $v = 15$ м/с. На основе этого и данных, представленных в [23] нами было проведено моделирование тепловых процессов в разрядной камере. Выявлено, что для обеспечения максимальной температуры, не приводящей к плавлению стенки камеры из полипропилена, температура плавления которого 171 °С [2], нужно обеспечить продувку со скоростью 16 м/с.

Устройством, обеспечивающим необходимую продувку, был выбран каналный вентилятор. Модель подбиралась исходя из скорости потока.

Объемный поток, $\text{м}^3 / \text{с}$.

$$Q = v \cdot S_{\text{п}}, \quad (7)$$

где v – скорость потока, м/с;

$S = \pi \cdot R^2 = 0,0095 \text{ м}^2$ - площадь поперечного сечения потока;

$$Q = 16 \cdot 0,0095 = 0,152 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Учитывая, что помимо вентилятора в системе циркуляции, очистки и охлаждения газа (см. рисунок 32) присутствует радиатор охлаждения, примем снижение скорости потока 50%. Следовательно, вентилятор будет подбираться исходя из объемного расхода $Q_1 = 0,152 \cdot 2 = 0,304 \text{ м}^3/\text{с} = 0,304 \cdot 3600 \text{ м}^3/\text{ч} = 1094,4 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На основе этих данных был выбран канальный вентилятор Elicent АХС 250 (рисунок 43), объемный расход которого составляет $1120 \text{ м}^3/\text{ч}$ [26].



Рисунок 43 – Канальный вентилятор Elicent АХС 250

При моделировании было учтено снижение скорости потока газа на 50% радиатором, установленного в камере системы циркуляции, очистки и охлаждения газа (см. рисунок 32). Следовательно, в пересчете объемного расхода в секундах получается $(1120 / 3600) \cdot 1 / 2 = 0,16 \text{ м}^3/\text{с}$.

Параметры моделирования указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Условия моделирования

Объемный расход в камере, $\text{м}^3/\text{с}$	Температура окружающей среды,	Давление окружающей среды, атм	Давление в камере	Скорость внешнего обдува, $\text{м}/\text{с}$	Начальная температура газа в камере,
0,16	20	1	2	1	40

Термограмма, полученная в результате моделирования представлена на рисунке 44.

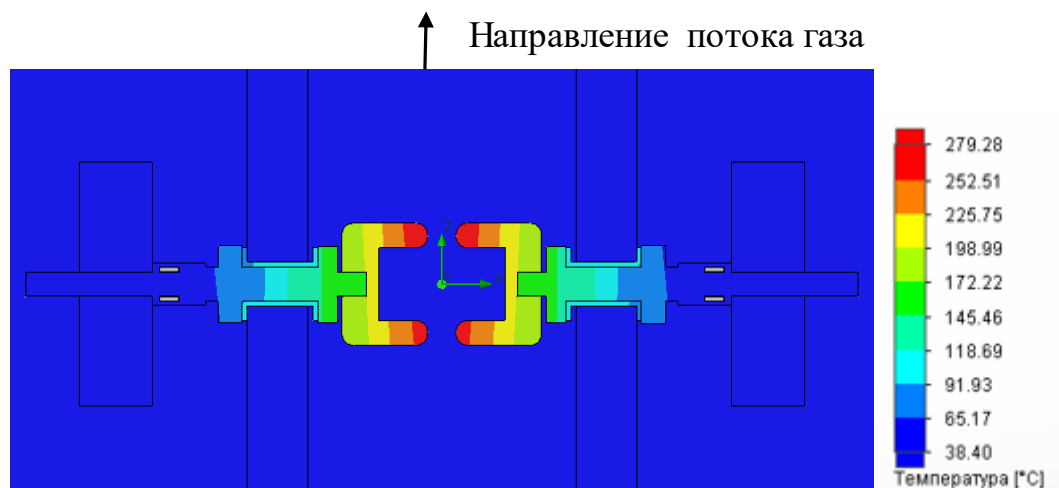


Рисунок 44 – Картина распределения температурного поля модели электродной системы

Максимальная температура составляет $t_3 = 279,28$ °С.

Продувка поперек канала разряда позволила снизить максимальную температуру на $\Delta t_{23} = 1796,32 - 279,28 = 373,67$ °С.

Вывод: наиболее эффективный вариант охлаждения электродов - продувка газа поперек канала разряда. Внешний теплообмен позволил снизить температуру на 373,67 °С, продувка поперек канала разряда – на 1517,04 °С. При этом температура стенки камеры не превышает 65 °С. Следовательно, продувка является наиболее эффективным способом снижения температуры электродной системы и позволяет избежать плавления стенки камеры из полипропилена, температура плавления которого 171 °С [2]

4 Экспериментальная часть

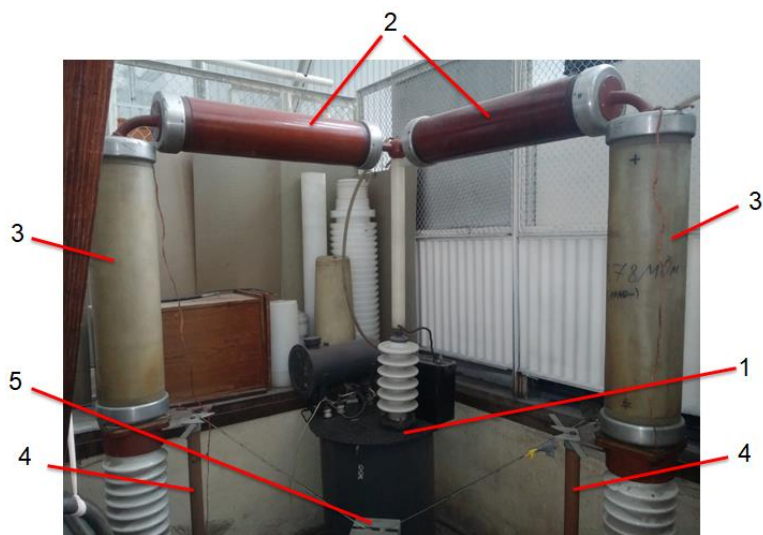
4.1 Время запаздывания срабатывания разрядника

4.1.1 Цель и методика эксперимента

Цель эксперимента заключается в определении времени запаздывания изготовленного разрядника для генератора импульсных напряжений, предназначенного для электроимпульсного бурения, и сопоставление полученных данных с характеристиками рассмотренных ранее разрядников, и, далее, проведение анализа экспериментальных данных.

Определение времени запаздывания срабатывания разрядника были получены на реальном генераторе импульсных напряжений, предназначенного для электроимпульсного бурения (см. рисунок 32).

Зарядка генератора импульсных напряжений осуществлялась от источника на основе высоковольтного трансформатора ИОМ-100/25 (см. рисунок 45).



1 – высоковольтный трансформатор ИОМ-100/25;

2 – выпрямители; 3 – защитные сопротивления;

4 – ДПН, 5 – автоматический заземлитель

Рисунок 45 – Источник выпрямленного высокого напряжения

Диоды (2) выполняют функцию выпрямления напряжения. Источник обеспечивает однополярную («плюсом», «минусом») и двуполярную зарядку. Защитную функцию выполняют резисторы (3), они же ограничивают зарядный ток. Защитное шунтирование на заземление осуществляется автоматическим заземлителем (5). В нашем случае зарядка осуществлялась положительным напряжением.

Измерение зарядного напряжения осуществлялось киловольтметром С-100 (см. рисунок 46).



Рисунок 46 – Киловольтметр С – 100

Регистрация импульсов осуществлялась системой состоящей из электронного осциллографа Tektronix TDS2014 (см. рисунок 47, а) и делителями напряжения:

- 1) Для измерения напряжения с запускающего генератора использовался высоковольтный импульсный делитель напряжения ДНВ - 25 (см. рисунок 47, б).

а)



б)



Рисунок 47 - Осциллограф Tektronix TDS2014 (а) и импульсный делитель напряжения ДНВ – 25 (б)

- 2) Для регистрации импульса на первом межэлектродном промежутке ГИН использовался делитель КВЦ-120 (см. рисунок 48, а).
- 3) Для регистрации выходного импульса генератора импульсных напряжений использовался делитель ДИН-2 (см. рисунок 48, б).

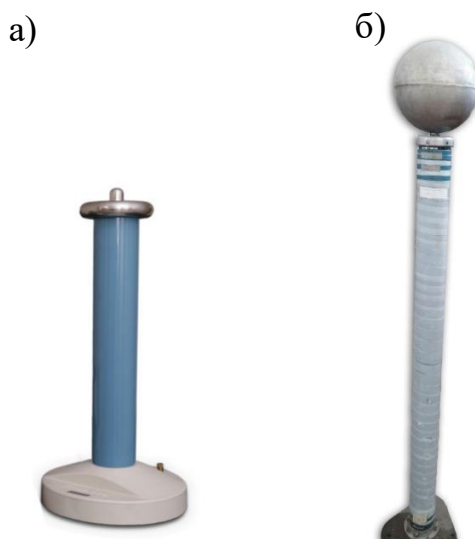


Рисунок 48 - Делители напряжения ДИН – 2 (а) и КВЦ – 120 (б)

На стороне осциллографа установлены согласующие сопротивления 75 Ом и фильтрующее сопротивление 1 кОм.

Некоторые характеристики измерительной системы и их назначение в экспериментальной схеме представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Назначение элементов измерительной системы

Прибор	Назначение
Tektronix TDS2014	Прием сигналов с делителей напряжения и получение осциллограмм
ДНВ – 25	Регистрация импульса с запускающего генератора
КВЦ – 120	Регистрация импульса на первом межэлектродном промежутке ГИН
ДИН – 2	Регистрация выходного импульса генератора с последнего конденсатора
Электростатический киловольтметр С - 100	Измерение зарядного напряжения

Продолжение таблицы 4

Согласующее сопротивление 75 Ом	Согласование волнового сопротивления передающего кабеля РК-75
Фильтрующее сопротивление 1 кОм	Снижение помех
3 коаксиальных кабеля РК - 75 длиной 15 м	Передающие линии с делителями напряжения к осциллографу

Технические характеристики делителей напряжения представлены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 – Технические характеристики КВЦ 120:

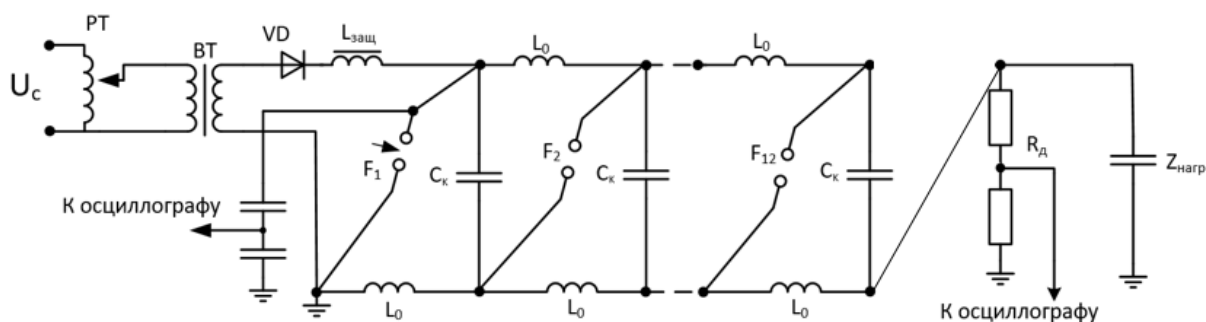
Параметр	Значение
Амплитудное значение максимального измеряемого напряжения	180 кВ
Входное сопротивление	500 МОм \pm 1%
Класс точности, %	0,5
Длина выходного коаксиального кабеля, м	3

Конструктивно ДИН 2 представляет собой изоляционную трубу из винипласта с наружным диаметром 106 мм, высотой 1600 мм, снабженную с обеих сторон металлическими фланцами-экранами. Высоковольтное плечо ДИН 2 сопротивлением 13,85 кОм выполнено нихромовым проводом марки ПЭВНХ-0,2 мм, низковольтное плечо сопротивлением 1,3 Ом выполнено из трех параллельно соединенных композиционных малоиндуктивных резисторов типа ТВО – 0,25 Вт – 3,9 Ом. Так же в делителе предусмотрено согласующее сопротивление 75 Ом.

Таблица 6 – Технические характеристики ДНВ 25:

Параметр	ДНВ-25
Рабочее напряжение, кВ	25,0
Входные: активное сопротивление, МОм ёмкость, пФ	100,0 ~ 3,0
Коэффициент деления	$3 \cdot 10^3$
Полоса пропускания, МГц	0...35,0
Испытательное напряжение, кВ: постоянное импульсное	30,0 40,0
Погрешность измерения, %	3
Длина выходного коаксиального кабеля, м	3,0

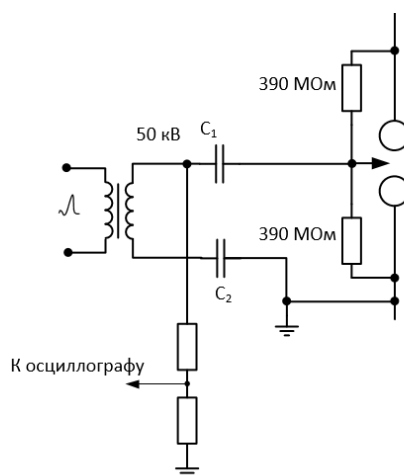
Схема измерения напряжения на первом межэлектродном промежутке и на выходе ГИН представлена на рисунке 49.



U_c – напряжение сети; ВТ – высоковольтный трансформатор; VD – выпрямительный диод; $L_{защ}$ – защитный дроссель; L_0 – зарядный дроссель; $Z_{нагр}$ – сопротивление нагрузки

Рисунок 49 – Схема регистрации импульсов

Схема измерения напряжения на запускающем генераторе на рисунке 50.



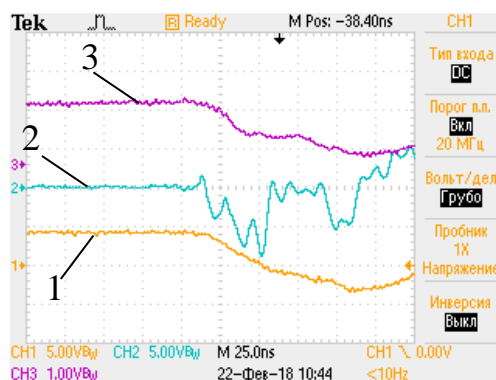
C_1, C_2 – конденсаторы

Рисунок 50 – Схема регистрации импульсов на генераторе запуска

4.1.2 Результаты эксперимента

4.1.2.1 Тест на синхронизацию

Перед началом эксперимента был проведен тест на синхронизацию. На все 3 делителя напряжения был подан сигнал с одного источника – генератора запуска. Осциллограмма теста на синхронизацию приведена на рисунке 51.



1 – напряжение, измеренное делителем запускающего генератора;

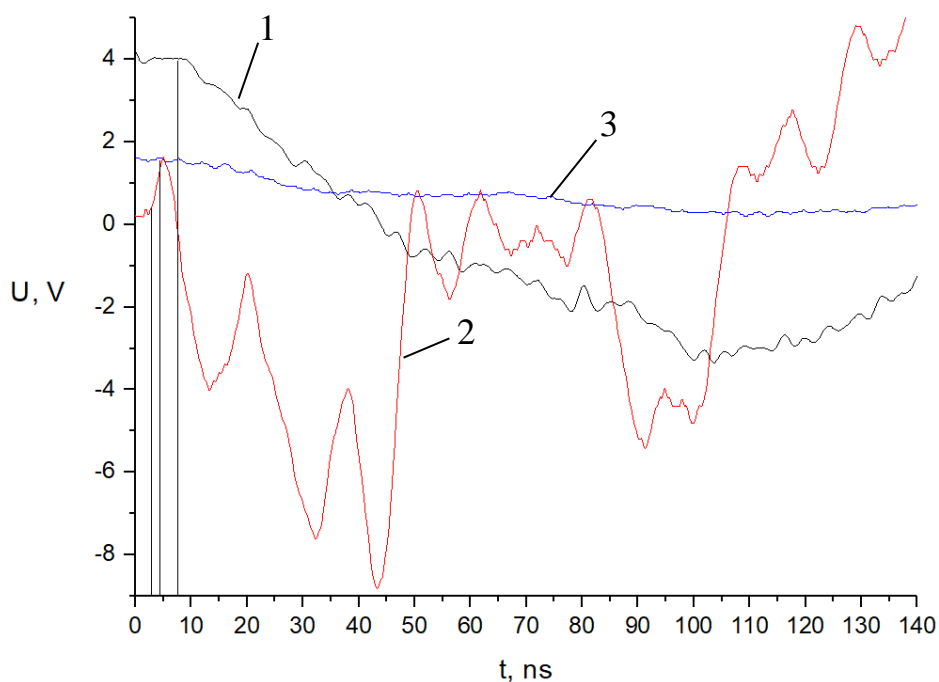
2 – напряжение, измеренное делителем первого промежутка

3 – напряжение, измеренное делителем последнего промежутка

Рисунок 51 – Осциллограмма теста на синхронизацию

В программе Origin определим разброс по времени фиксирования сигналов с делителей (см. рисунок 52). Так как в данном случае важны

временные характеристики, то значения напряжения на осциллограмме указаны без учета коэффициента деления делителя и фильтрующего сопротивления.



- 1 – напряжение, измеренное делителем запускающего генератора;
- 2 – напряжение, измеренное делителем первого промежутка
- 3 – напряжение, измеренное делителем последнего промежутка

Рисунок 52 – Определение времени запаздывания

Полученные данные занесем в таблицу 7.

Таблица 7 – Результаты теста на синхронизацию

t_1 , нс	t_2 , нс	t_3 , нс
4,6	2,8	7

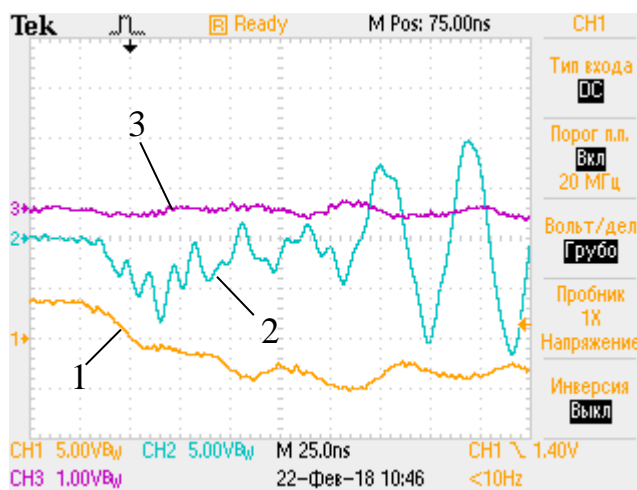
В таблице t_1 – момент прихода запускающего импульса, t_2 – момент срабатывания первого межэлектродного промежутка, t_3 – момент срабатывания последнего межэлектродного промежутка.

Вывод: разброс по времени между моментом прихода поджигающего импульса и моментом срабатывания основного разрядного промежутка первого разрядника составляет $\Delta t_{1,2} = 1,8$ нс, между делителем запускающего генератора и последнего промежутка $\Delta t_{1,3} = 4,2$ нс, между делителем первого и последнего межэлектродного промежутка $\Delta t_{2,3} = 2,4$ нс.

4.1.2.2 Определение времени запаздывания срабатывания первого промежутка после подачи пускового импульса.

На основной межэлектродный промежуток было подано напряжение 25 кВ. Инициирование осуществлялось подачей на поджигающий электрод запускающего импульса 50 кВ.

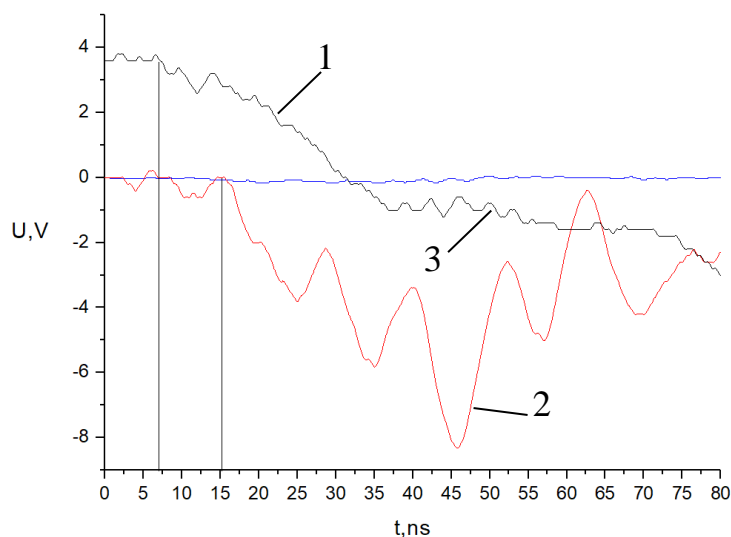
В результате эксперимента была получена осциллограмма (см. рисунок 53):



- 1 – напряжение, измеренное делителем запускающего генератора;
- 2 – напряжение, измеренное делителем первого промежутка;
- 3 – напряжение, измеренное делителем последнего промежутка;

Рисунок 53 – Осциллограмма

В программе Origin было определено время запаздывания срабатывания основного разрядника после подачи поджигающего импульса (см. рисунок 54).



- 1 – напряжение, измеренное делителем запускающего генератора;
- 2 – напряжение, измеренное делителем первого промежутка
- 3 – напряжение, измеренное делителем последнего промежутка

Рисунок 54 – Определение времени запаздывания

Таблица 8 – Результаты измерения

№ опыта	t_1 , нс	t_2 , нс
1	7,5	15,8
2	4,6	13,4
3	8,5	14
4	7,5	15

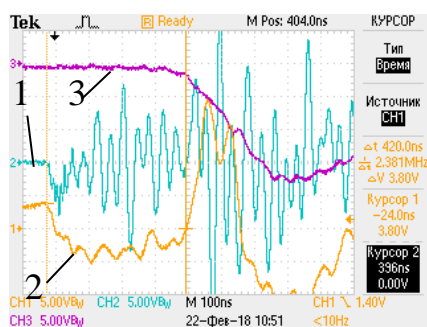
По таблице 8 средний момент срабатывания пускового импульса составляет $t_1 = 7,03$ нс, первого промежутка $t_2 = 14,55$ нс.

Вывод: среднее время запаздывания между моментом прихода поджигающего импульса и моментом срабатывания основного разрядного промежутка первого разрядника составляет $\tau_{31-2} = 7,52$ нс.

4.1.2.3 Определение времени запаздывания срабатывания первого промежутка, последнего промежутка и пускового импульса.

В этом опыте зарядное напряжение составляло $U_0 = 25$ кВ, иницирование осуществлялось поджигающим импульсом $U_3 = 50$ кВ.

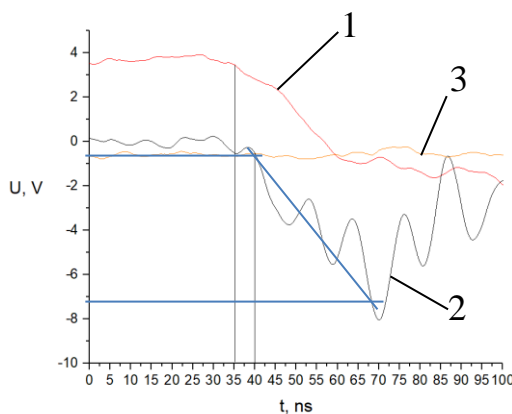
Осциллограмма первого опыта представлена на рисунке 55.



- 1 – напряжение, измеренное делителем запускаящего генератора;
- 2 – напряжение, измеренное делителем первого промежутка
- 3 – напряжение, измеренное делителем последнего промежутка

Рисунок 55 – Осциллограмма

В программе Origin определим моменты прихода пускового импульса и срабатывания основного промежутка первого разрядника (см. рисунок 56).

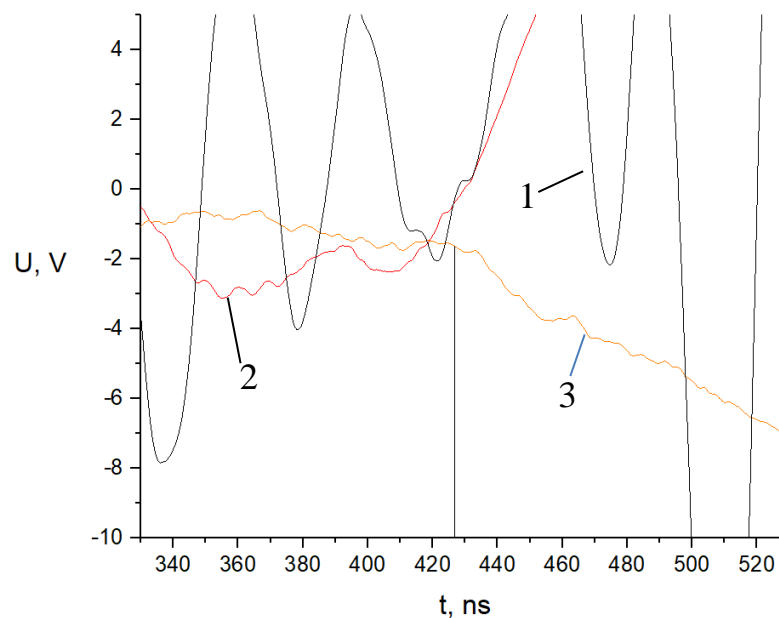


- 1 – напряжение, измеренное делителем запускаящего генератора;
- 2 – напряжение, измеренное делителем первого промежутка
- 3 – напряжение, измеренное делителем последнего промежутка

Рисунок 56 – Осциллограмма

Полученные данные внесем в таблицу 9.

Время срабатывания последнего промежутка определим по рисунку (см. рисунок 57)



- 1 – напряжение, измеренное делителем запускающего генератора;
- 2 – напряжение, измеренное делителем первого промежутка
- 3 – напряжение, измеренное делителем последнего промежутка

Рисунок 57 - Осциллограмма

Всего были проведено 5 опытов по измерению времени запаздывания. Результаты приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты измерений

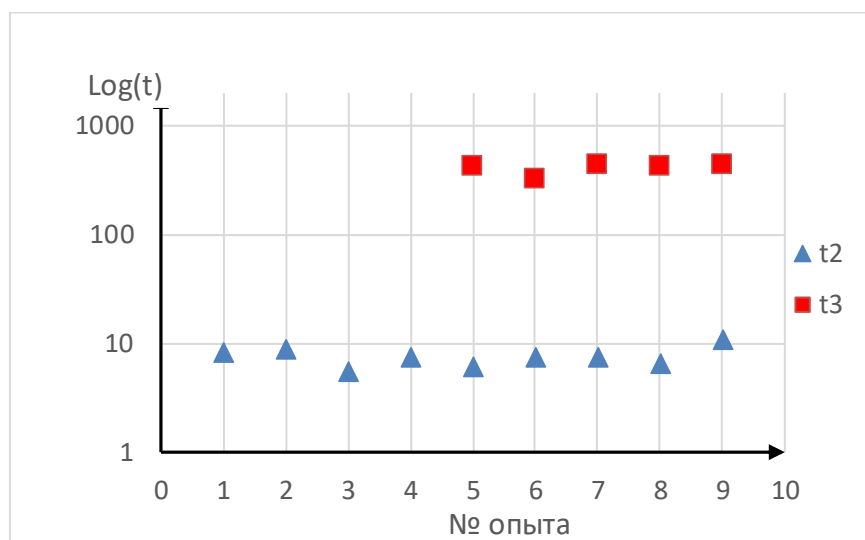
	t_1 , нс	t_2 , нс	t_3 , нс
5	9	15	427
6	12,5	20	330
7	5	12,5	430
8	7,6	14	420,4
9	3,6	14,4	432
t_{cp}	7,54	15,8	407,88

Все данные эксперимента по определению времени запаздывания срабатывания разрядника приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Сводные данные по всем опытам

№	t_1 , нс	t_2 , нс	t_3 , нс
1	7,5	15,8	-
2	4,6	13,4	-
3	8,5	14	-
4	7,5	15	-
5	9	15	427
6	12,5	20	330
7	5	12,5	430
8	7,6	14	420,4
9	3,6	14,4	432
t_{cp}	7,31	14,9	407,88

По таблице 10 построим график для моментов прихода поджигающего импульса и срабатывания основного разрядного промежутка в логарифмической шкале (см. рисунок 58).



t_2 - момент прихода поджигающего импульса;

t_3 - момент срабатывания последнего разрядника

Рисунок 58 – Моменты регистрации импульсов в зависимости от номера эксперимента

На рисунке 58 за начало отсчета принят момент прихода поджигающего импульса.

На рисунке 59 показано время запаздывания срабатывания основного искрового промежутка первого разрядника. За начало отсчета принят момент прихода поджигающего импульса.

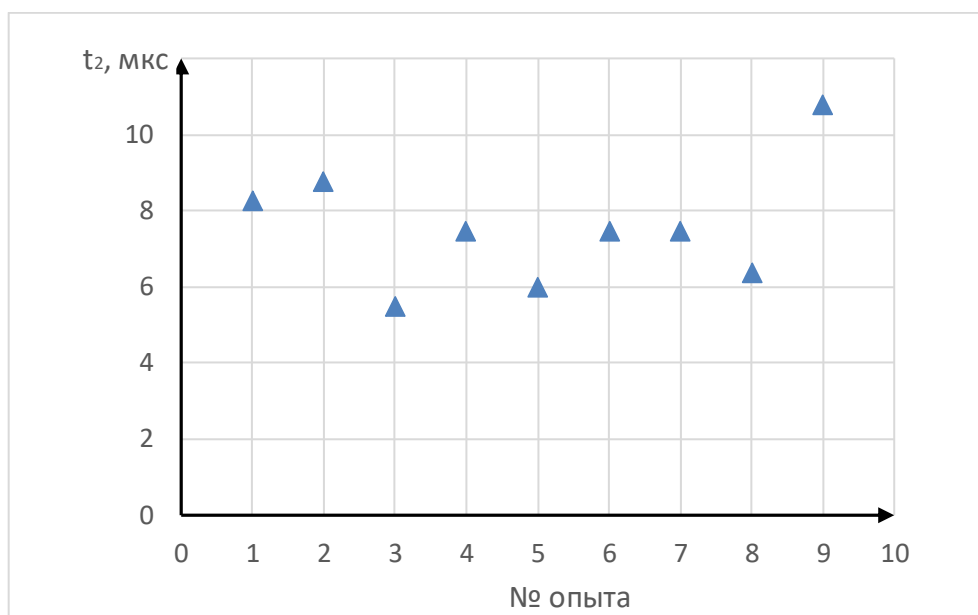


Рисунок 59 – Время запаздывания срабатывания разрядника в зависимости от эксперимента

Среднее время запаздывания срабатывания первого разрядника составило $t_{1-2} = 7,58$ нс

Вывод: разброс по времени между моментом прихода поджигающего импульса и моментом срабатывания основного разрядного промежутка первого разрядника составляет $\Delta t_{1,2} = 7,58$ нс, между моментом прихода поджигающего импульса и моментом срабатывания разрядного промежутка последнего разрядника $\Delta t_{1,3} = 400,57$ нс, между моментами срабатывания разрядных промежутков первого и последнего разрядников $\Delta t_{2,3} = 392,98$ нс.

Полученные данные по времени запаздывания между моментом прихода поджигающего импульса и моментом срабатывания основного разрядного промежутка первого разрядника ($\tau_{31-2} = 7,58$) схожи с временем запаздывания каскадного разрядника с инициированием по принципу «искажения поля» (τ_3

= 5) - таблица 1, и превосходят тригatron с таким же принципом инициирования ($\tau_3 = 20$ нс) – таблица Б.5 (см. приложение Б).

4.2 Электрическая эрозия электродов в генераторе импульсных напряжений

4.2.1 Цель и методика эксперимента

Цель эксперимента заключается в определении массы эродированной поверхности электродов, находящихся на первой ступени генератора импульсных напряжений и расчет предполагаемого ресурса стабильной работы разрядника.

Определение массы металла потерянной электродами вследствие электрической эрозии после 15000 импульсов, с энергией в импульсе 2000 Дж осуществлялась на реальном генераторе импульсных напряжений для электроимпульсного бурения (см. рисунок 32).

Измерение массы электродов до прохождения 15000 импульсов и после осуществлялось лабораторными весами CAS MWP с погрешностью измерения 0,05 г (см. рисунок 60).

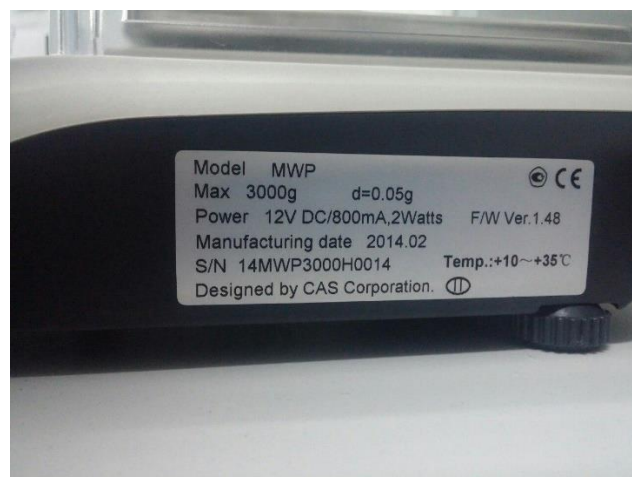


Рисунок 60 – Лабораторные весы CAS MWP

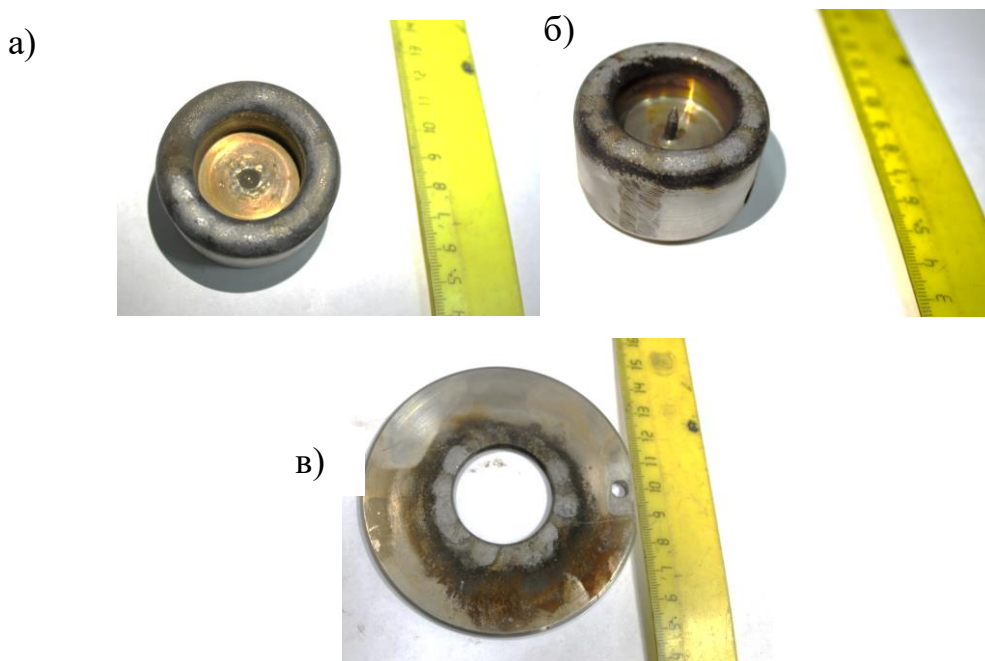
4.2.2 Результаты измерений и расчетов

Результаты измерения массы электродов до и после 15000 импульсов представлены в таблице 11. Измерение массы осуществлялось серией из 3х взвешиваний. В таблице указаны средние значения масс.

Таблица 11 - Результаты измерения массы электродов

Электрод	Масса до 15000 импульсов, г	Масса после 15000 импульсов, г
Основной электрод №1	339,7	339,567
Основной электрод №2	337,1	336,967
Поджигающий электрод	254,11	253,9

Фотографии электродов, подвергнутых серии из 15000 импульсов представлены на рисунке 61.



а – основной электрод без острия; б) основной электрод с острием;
в) поджигающий электрод

Рисунок 61 – Фотографии электродов, подвергнутых серии из 15000 импульсов

4.2.2.1 Экспериментальные данные

Масса потерянного металла электродов составляет:

- 1) Электрод №1: $m_{п1} = 339,7 - 339,567 = 0,133$ г;
- 2) Электрод №2 (с острием): $m_{п2} = 339,1 - 339,967 = 0,133$ г;
- 3) Поджигающий электрод: $m_{п3} = 254,11 - 253,90 = 0,21$ г;

Процентное соотношение массы потерянного металла по сравнению с первоначальной массой электрода составляет:

- 1) Электрод №2 (с острием): $m_{п1\%} = 0,133 \cdot 100 / 337,1 = 0,039\%$;
- 2) Поджигающий электрод: $m_{п3\%} = 0,21 \cdot 100 / 254,11 = 0,083\%$

4.2.2.2 Расчетные данные

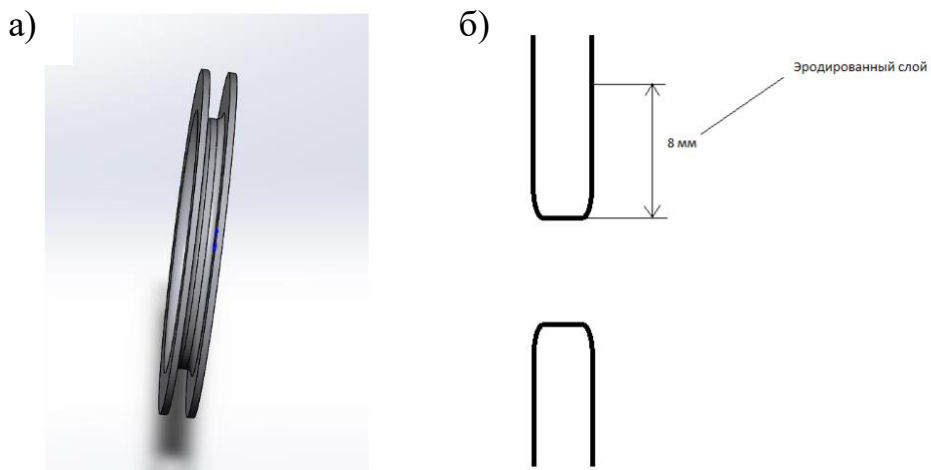
В программе SolidWorks 2017, зная материал электродов – Сталь 12X18Н10Т, была определена масса электродов:

Электрод №1: $m1' = m2' = 406,67$ г;

Поджигающий электрод: $m3' = 265,55$ г.

Стабильность работы разрядника снизится после того, как вследствие эрозии увеличится межэлектродное расстояние. В генераторе импульсных напряжений (см. рисунок 32) основные электроды первого промежутка (см. рисунок 29) удалены от поджигающего электрода (см. рисунок 28) на расстояние $d = 4$ мм. Можно предположить, что, если эрозия основных и поджигающего электрода будет составлять слой металла в 1 мм, то расстояние между основными электродами и поджигающим увеличится на 50%. Это может привести к снижению стабильности срабатывания разрядника.

В программной среде SolidWorks рассчитаем массу эродированного слоя металла, при условии, что толщина этого слоя составляет 1 мм. Модель эродированного слоя представлена на рисунках 62 и 63.

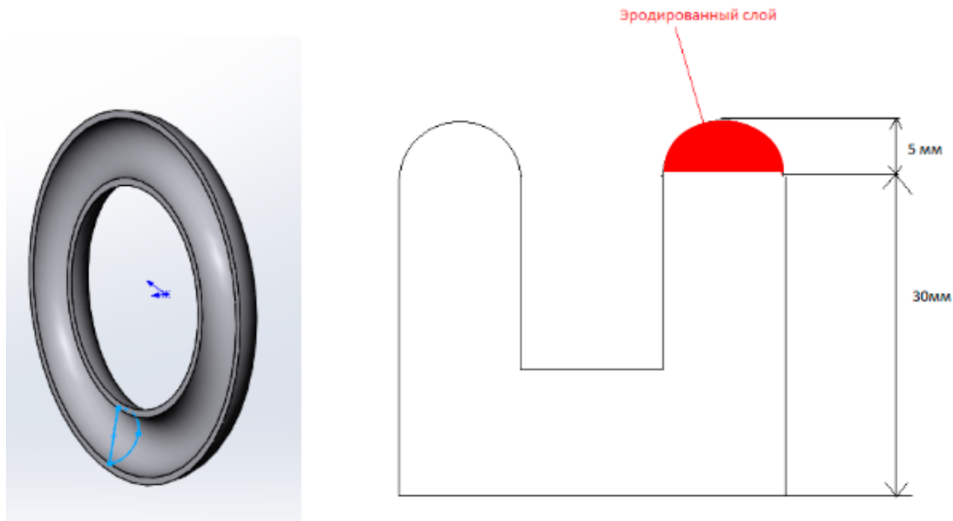


а – модель эродированного слоя, вырезанного из электрода;

б – геометрия эродированного слоя;

Рисунок 62 – Модель для расчета массы

Геометрия распространения эрозии по основному и поджигающему электроду (см. рисунок 62 и 63) была выбрана исходя внешнего вида этих электродов, подвергнутых серии из 15000 импульсов (см. рисунок 63).



а – модель эродированного слоя, вырезанного из электрода;

б – геометрия эродированного слоя;

Рисунок 63 – Модель для расчета массы эродированного слоя 1 мм основного электрода

В результате моделирования были получены массы потерянного слоя металла 1 мм:

1) Основной электрод №1(2): $m'_{п1(2)} = 14,03$ г;

2) Поджигающий электрод: $m'_{п3} = 18,63$ г;

Процентное соотношение массы потерянного металла по сравнению с первоначальной массой электрода составляет:

1) Электрод №1(2): $m_{п1(2)\%} = 14,03 \cdot 100 / 406,67 = 3,45\%$;

2) Поджигающий электрод: $m_{п3\%} = 18,63 \cdot 100 / 265,55 = 7,02\%$

4.2.2.3 Анализ полученных данных

Сопоставив результаты эксперимента и моделирования определим ресурс стабильной работы разрядника

Ресурс работы поджигающего электрода:

$$N_{\text{подж.э.}} = 7,02 \cdot 15000 / 0,083 = 1\ 268\ 675 \text{ импульсов.}$$

Ресурс работы основного электрода:

$$N_{\text{осн.э.}} = 3,45 \cdot 15000 / 0,039 = 1\ 326\ 924 \text{ импульса.}$$

Оценим эрозию поджигающего электрода способом, указанным в п.1.4.1.

Параметры разрядного тока, которые были получены при бурении приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Параметры разрядного тока

I_m , кА	T, мкс	n	f, имп/с
12	5	4	5

В таблице I_m – максимальный ток; T – период, n – количество периодов в течение которых действует разрядный ток; f – частота импульсов.

Удельная эрозия выражается, как отношение объема потерянного металла контактов или электродов к произведению действующего значения тока на время существования дуги, $\text{см}^3 / \text{кА} \cdot \text{с}$

$$\mathfrak{E} = \frac{\Delta V}{t \cdot I} \quad (8)$$

где $\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho \cdot n}$ – объем потерянного металла,

Δm – масса потерянного металла,

n – число импульсов,

$\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$ – плотность металла 12Х18Н10Т.

t – время существования дуги.

$I = I_{\text{макс}} / \sqrt{2} = 12 / \sqrt{2} = 8,49 \text{ кА}$ – действующее значение тока.

Объем потерянного металла поджигающего электрода за 15000 импульсов составляет

$$\Delta V = \frac{0,21 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{7900} = 0,027 \text{ см}^3.$$

Так как в одном импульсе дуга горит в течение $t_1 = T \cdot n = 5 \cdot 4 = 20$ мкс, следовательно, за 15000 импульсов дуга существовала в течение $t_{\text{полн}} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 15000 = 0,3 \text{ с}$.

Удельная эрозия

$$\mathfrak{E} = \frac{0,027}{0,3 \cdot 8,49} = 0,01 \text{ см}^3 / \text{кА} \cdot \text{с}.$$

Оценим эрозию электродов по [20] (см. рисунке 64).

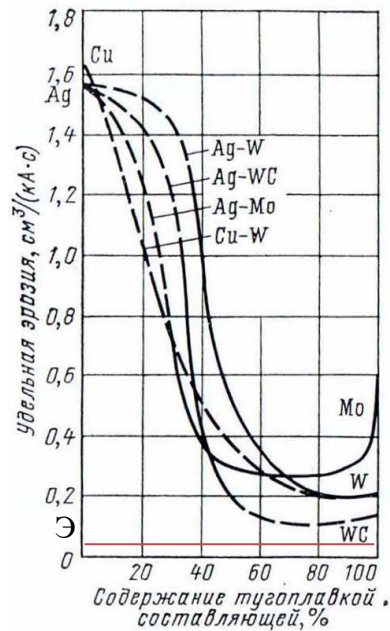


Рисунок 64 – Количественная оценка эрозии [20]

Рассчитаем теоретическое значение потерянной массы за импульс.

Количество электричества, прошедшее через разрядник за один импульс, Кл

$$q = C \cdot U_{\text{ВЫХ}} \quad (9)$$

где $C = 0,029 \cdot 10^{-6}$ – емкость генератора, Ф;

$U_{\text{ВЫХ}} = 360 \cdot 10^3$ – выходное напряжение, В.

$$q = 0,029 \cdot 10^{-6} \cdot 360 \cdot 10^3 = 0,01 \text{ Кл.}$$

Если предположить, что в искровом разряде распыление катода происходит в основном под действием кинетической энергии ионов [14], то можно рассчитать массу потерянного металла за один импульс исходя из его состава.

Электрический заряд, Кл

$$q = n \cdot e, \quad (10)$$

где n – число электронов;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд.

Определим число частиц исходя из прошедшего за импульс через разрядник заряда

$$n = \frac{q}{e} = \frac{0,01}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,53 \cdot 10^{16} \text{ частиц.}$$

Известно, что материал электродов - нержавеющая сталь марки 12X18H10T. Следовательно, по [27] определяем состав стали: 0,12% углерода (C), 18% хрома (Cr), 10% никеля (Ni) и менее 1% титана (Ti), остальное железо (Fe) – примем 72%.

Определим теоретическое значение массы потеряннного металла по основным компонентам – Cr, Ni и Fe.

Масса ионов,

$$m_{Me} = \left(\frac{M}{N_A} - m_e \right), \quad (11)$$

где M – молярная масса, г / моль;

N_A – число Авогадро, моль⁻¹;

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г – масса электрона.

Масса ионов металлов в зависимости от их содержания в материале электродов:

$$m_{Fe} = ((56 / 6 \cdot 10^{23}) - 9,1 \cdot 10^{-28}) \cdot 0,72 = 6,72 \cdot 10^{-23} \text{ г.}$$

$$m_{Cr} = ((52 / 6 \cdot 10^{23}) - 9,1 \cdot 10^{-28}) \cdot 0,18 = 1,56 \cdot 10^{-23} \text{ г.}$$

$$m_{Ni} = ((58,7 / 6 \cdot 10^{23}) - 9,1 \cdot 10^{-28}) \cdot 0,1 = 0,97 \cdot 10^{-23} \text{ г.}$$

Исходя из числа частиц, определим теоретическое значение массы потеряннного металла

$$m_{э.т.} = (m_{Fe} + m_{Cr} + m_{Ni}) \cdot n = (6,72 + 1,56 + 0,97) \cdot 10^{-23} \cdot 6,53 \cdot 10^{16} = 6,04 \cdot 10^{-6} \text{ г.}$$

Определим экспериментальное значение массы потеряннного металла за один импульс для основного электрода:

$$m_{э.эксп.} = m_{пл} / N = 0,133 / 15000 = 8,867 \cdot 10^{-6} \text{ г.}$$

Вывод: из двух полученных результатов расчета ресурса работы электродов выбираем наименьшее значение, так оно будет являться

основополагающим фактором стабильной работы разрядника в целом. Следовательно, ресурс работы первого разрядника примем $N = 1\,268\,675$ ($\sim 1,2 \cdot 10^6$) импульсов. Теоретическое значение массы потерянного металла (6,04 мкг) практически совпадает с экспериментальным (8,867 мкг). Различие в значениях может быть объяснено, как погрешностью расчетов, так и дополнительной потерей металла электродов вследствие его плавления при протекании тока $I_{\text{макс}} = 12$ кА.

Как видно из рисунка 64, удельная эрозия электродов при наших режимах работы разрядника значительно меньше полученных данных в [26]. Это объясняется значительно более короткими временами воздействия импульса тока, что сильно снижает градиент температур в зоне контакта плазмы разряда с материалом электродов. В этом режиме эрозия в основном обусловлена испарением, а не плавлением материала электродов. Учитывая, что за импульс количество электричества, прошедшее через разрядник составляет $q = 0,01$ Кл, работа разрядника обеспечивается в режиме до эрозионного скачка (см. рисунок 18).

Количественная оценка эрозии по способу, указанному в [20] может считаться достаточно универсальной при сравнении данных, полученных в сходных условиях.

4.3 Электрическая эрозия электродов в разрядной камере

4.3.1 Цель и методика эксперимента

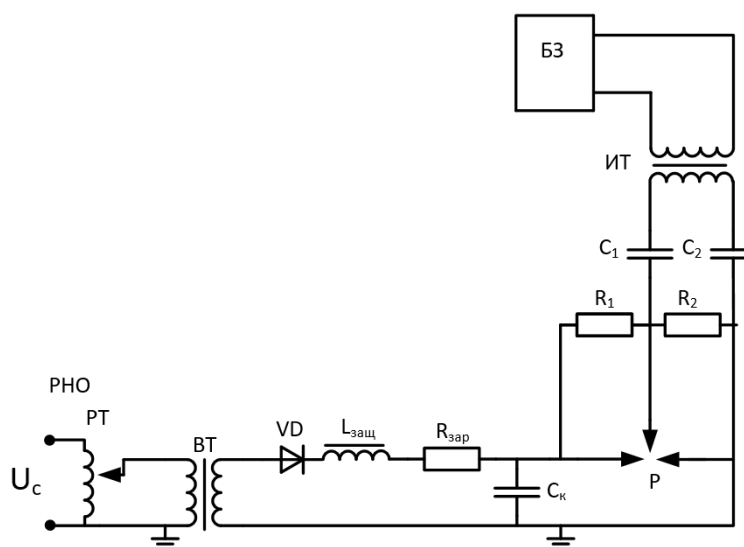
Цель эксперимента заключается в определении массы эродированной поверхности электродов, установленных в разрядной камере без продувки газа поперек канала разряда.

Проведение эксперимента по определению ресурса электродов осуществлялось в разрядной камере (см. рисунок 65), конструкция которой полностью повторяет первый разрядный промежуток ГИН, предназначенного для электроимпульсного бурения.



Рисунок 65 – Разрядная камера

Электрическая схема установки представлена на рисунке 66.



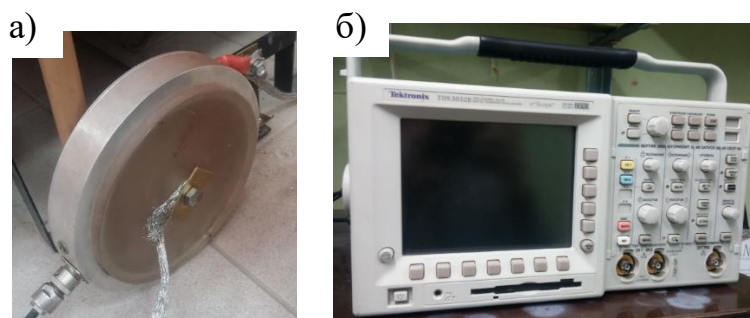
РТ – регулировочный трансформатор; ВТ – высоковольтный трансформатор;
 VD – выпрямительное устройство; $R_{зар}$ – зарядное сопротивление; РНО –
 регулятор напряжения однофазный, R_1 , R_2 – резисторы ТВО; C_1 , C_2 , C_k –
 конденсаторы, БЗ – блок запуска

Рисунок 66 – Электрическая схема установки

Эксперимент состоял из серии 30000 импульсов. Зарядное напряжение составляло $U_0 = 16$ кВ. Частота срабатывания разрядника – 5 имп/с.

Измерение массы электродов осуществлялось лабораторными весами CAS MWP с погрешностью измерения 0,05 г (см. рисунок 60).

Измерение тока осуществлялось с помощью системы, состоящей из пояса Роговского (см. рисунок 67, а) электронного осциллографа TDS 3032В (см. рисунок 67, б)



а) Пояс Роговского; б) Электронный осциллограф TDS 3032В

Рисунок 67 – Измерительная система

Коэффициент преобразования пояса Роговского $K_{\Pi} = 0,4 \text{ В/кА}$.
Измерение температуры осуществлялось с помощью тепловизора Flir (см. рисунок 68)



Рисунок 68 – Тепловизор Flir

В ходе эксперимента была получена осциллограмма тока (см. рисунок 69)

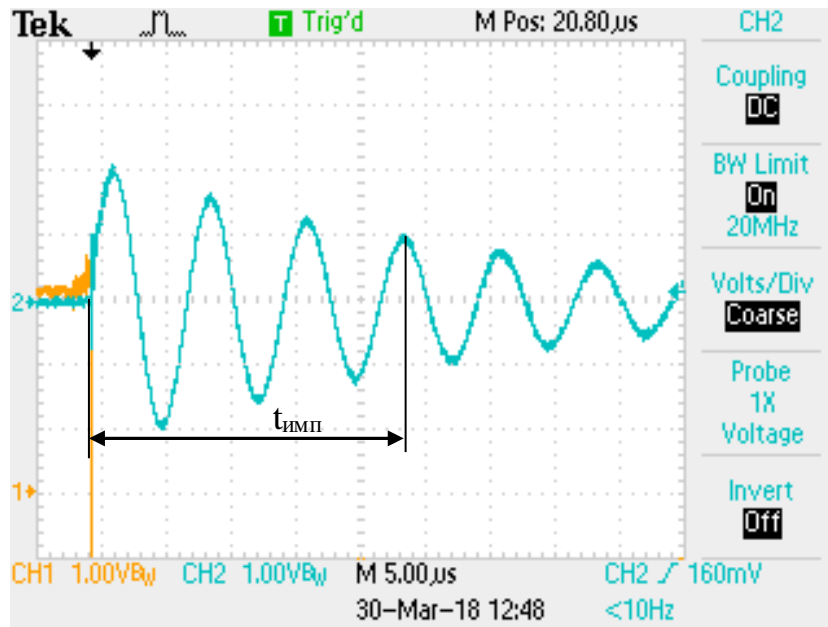


Рисунок 69 – Осциллограмма тока

Длительность импульса: $t_{\text{имп}} = 25 \text{ мкс}$

Коэффициент преобразования пояса Роговского $K_{\text{п}} = 0,4 \text{ В/кА}$.

$$K_{\text{п}} = 0,4 \frac{\text{В}}{\text{кА}} = \frac{10^3}{0,4} = 2,5 \frac{\text{кА}}{\text{В}}$$

Максимальный ток канала разряда $I_{\text{м}} = K_{\text{п}} \cdot U_{\text{осц}} = 2 \cdot 2,5 = 5 \text{ кА}$.

Действующее значение тока $I_{\text{д}} = \frac{I_{\text{м}}}{\sqrt{2}} = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3,54 \text{ кА}$

Энергия, запасаемая конденсатором по формуле (12)

$$W = \frac{0,4 \cdot 10^{-6} \cdot (16 \cdot 10^3)^2}{2} = 51 \text{ Дж.}$$

Следовательно, энергия выделяющаяся в нагрузке за один импульс без учета потерь составляет 51 Дж.

4.3.2 Результаты измерений и расчетов

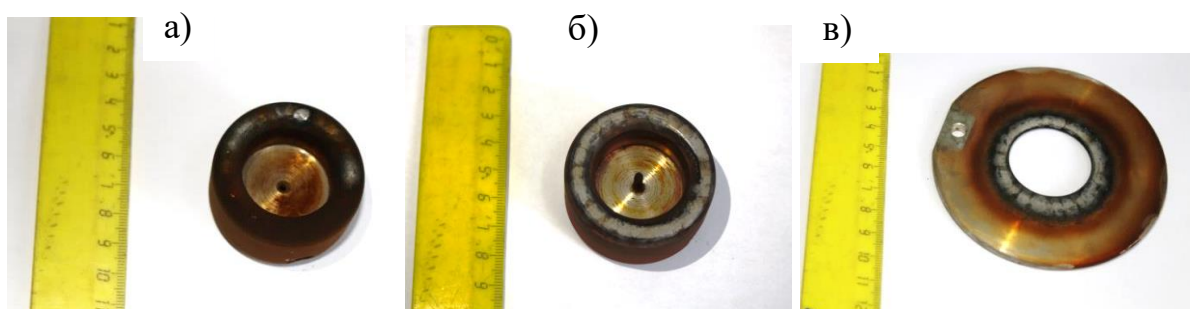
4.3.2.1 Эрозия электродов

Результаты измерения массы электродов до и после 30000 импульсов представлены в таблице 13. Измерение массы осуществлялось серией из 3х взвешиваний. Далее было рассчитано среднее значение, которое представлено в таблице.

Таблица 13 - Результаты измерения массы электродов

Электрод	Масса до 30000 импульсов, г	Масса после 30000 импульсов, г
Основной электрод №1	314,167	314,133
Основной электрод №2	306,4	306,33
Поджигающий электрод	261,067	260,967

Фотографии электродов, подвергнутых серии из 30000 импульсов представлены на рисунке 70.



а – основной электрод без острия; б – основной электрод с острием; в – поджигающий электрод

Рисунок 70 – Фотографии электродов, подвергнутых серии из 15000 импульсов

4.3.2.1 Экспериментальные данные

Масса потерянного металла составляет:

- 1) Электрод №1 (с острием): $m_{п1} = 314,167 - 314,133 = 0,034$ г;
- 2) Электрод №2: $m_{п2} = 306,4 - 306,33 = 0,07$ г;
- 3) Поджигающий электрод: $m_{п3} = 261,067 - 260,967 = 0,1$ г;

Процентное соотношение массы потерянного металла по сравнению с первоначальной массой электрода составляет:

- 1) Электрод №1: $m_{п1\%} = 0,034 \cdot 100 / 314,167 = 0,011\%$;
- 2) Электрод №2 (с острием): $m_{п2\%} = 0,07 \cdot 100 / 306,4 = 0,023\%$;

3) Поджигающий электрод: $m_{п3\%} = 0,1 \cdot 100 / 261,067 = 0,038\%$

4.3.2.3 Анализ полученных данных

Для проведения анализа полученных данных были использованы данные моделирования из предыдущего эксперимента.

Было определено, для ухудшения стабильности срабатывания разрядника потеря металла основных электродов должно составлять $m_{п1(2)\%} = 3,45\%$, поджигающего электрода $m_{п3\%} = 7,02\%$.

Сопоставив результаты эксперимента и моделирования определим ресурс стабильной работы разрядника

Ресурс работы поджигающего электрода:

$$N_{\text{подж.э.}} = 7,02 \cdot 30000 / 0,038 = 5\,542\,106 \text{ импульсов.}$$

Ресурс работы основных электродов:

$$\text{С острием: } N_{\text{осн.э.1}} = 3,45 \cdot 30000 / 0,011 = 9\,409\,091 \text{ импульса.}$$

$$\text{Без острия: } N_{\text{осн.э.2}} = 3,45 \cdot 30000 / 0,023 = 4\,500\,000 \text{ импульса.}$$

Оценим эрозию по способу, указанному в [29]

Объем эродированного металла составляет

$$\Delta V = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{7900} = 0,013 \text{ см}^3.$$

За 30000 импульсов дуга горела в течение $t_{\text{полн}} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 30000 = 0,75 \text{ с.}$

Удельная эрозия

$$\mathcal{E} = \frac{0,013}{0,75 \cdot 3,54} = 0,005 \frac{\text{см}^3}{\text{кА} \cdot \text{с.}}$$

Оценим эрозию (см. рисунок 71) электродов по графику, указанному в [20].

Определим теоретическое значение массы потерянного металла исходя из состава материала электродов.

Электрический заряд, проходящий через разрядник за импульс

$$q = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 10^3 = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ Кл.}$$

Число частиц

$$n = \frac{6,4 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 4 \cdot 10^{16} \text{ частиц.}$$

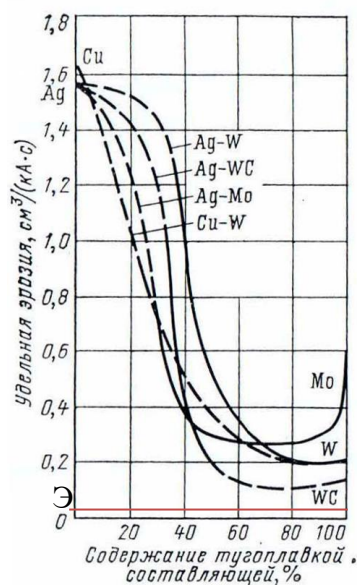


Рисунок 71 – Количественная оценка эрозии [20]

Теоретическое значение массы потерянного металла

$$m_{э.т.} = (m_{Fe} + m_{Cr} + m_{Ni}) \cdot n = (6,72 + 1,56 + 0,97) \cdot 10^{-23} \cdot 4 \cdot 10^{16} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ г.}$$

Г.

Определим экспериментальное значение массы потерянного металла за один импульс для первого и второго основных электродов:

$$m_{э.эксп1.} = m_{п1} / N = 0,034 / 30000 = 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ г.}$$

$$m_{э.эксп2.} = m_{п2} / N = 0,07 / 30000 = 2,33 \cdot 10^{-6} \text{ г.}$$

Вывод: из двух полученных результатов выбираем наименьший ресурс работы, так он будет являться основополагающим фактором стабильной работы разрядника в целом. Следовательно, ресурс работы первого разрядника примем $N = 4\,500\,000$ импульсов. Оценить эрозию по графику (см. рисунок 71) не получится, так как нет пересечения с кривыми. Удельная эрозия, как видно на рисунке 60, получилась значительно меньше данных, полученных в [29]. Как было отмечено в п.4.2, это можно объяснить более

короткими временами воздействия импульса тока, а так же его величиной. Эрозия материала электродов в данном опыте обусловлена испарением. Так как за импульс количество электричества, прошедшее через разрядник составляет $q = 6,4 \cdot 10^{-3}$ Кл, работа разрядника обеспечивается в режиме до эрозионного скачка (см. рисунок 20). Теоретическое значение массы основных электродов получилось меньше (в случае первого электрода – в 3,3 раза меньше, второго – в 1,59 раз меньше), чем было получено экспериментально. Такой результат можно объяснить погрешностью вычисления, а так же влиянием ионов газа в разрядном процессе. Масса потерянного металла у электрода с острием (катода) получилась в 2 раза меньше, чем у электрода без острия (анода). Причиной может быть характер эрозии: у анода эрозия происходит с большей потерей ионов металла, чем у катода.

Данные по эрозии обоих экспериментов сведены в таблицу 14.

Таблица 14 – Измерение электрической эрозии электродов

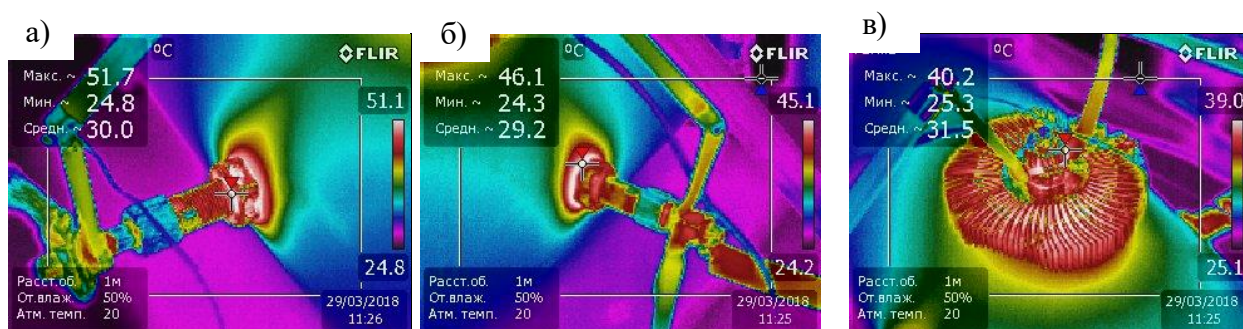
	ГИН	Разрядная камера
U _p , кВ	360	16
I _{макс} , кА	12	5
C, мкФ	0,029	0,4
N, имп	15000	30000
q _{имп} , Кл	0,01	$6,4 \cdot 10^{-3}$
m _{п1} , г / m _{п1} , %	0,133 / 0,039	0,034 / 0,011
m _{п2} , г / m _{п2} , %	0,133 / 0,039	0,07 / 0,023
m _{п3} , г / m _{п3} , %	0,21 / 0,083	0,1 / 0,038
Ресурс работы, имп	$1,2 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6$

Общий вывод по эрозии электродов: расчет предполагаемого ресурса работы электродов показывает, что в случае, когда поперек канала разряда осуществляется продувка газа, эрозия основных электродов происходит более равномерно, чем в случае, когда продувки нет. При продувке ресурс работы основных электродов получился одинаковый - 1 326 924 импульсов. В случае, когда продувки нет – эрозия основного электрода, у которого происходит

первичный разряд (ресурс - 4 500 000 импульсов), происходит быстрее, чем у второго основного электрода (ресурс - 9 409 091 импульс). Полученные значения удельной эрозии электродов при наших режимах работы разрядника значительно меньше полученных данных в [20]. Это объясняется значительно более короткими временами воздействия импульса тока, что сильно снижает градиент температур в зоне контакта плазмы разряда с материалом электродов.

4.3.3 Изменение температуры электродов

В ходе эксперимента каждые 2000 импульсов с помощью тепловизора фиксировалась температура держателей электродов (рисунок 72)



1, 2 – Держатели основных электродов; 3 – Держатель поджигающего электрода;

Рисунок 72 – Термограммы

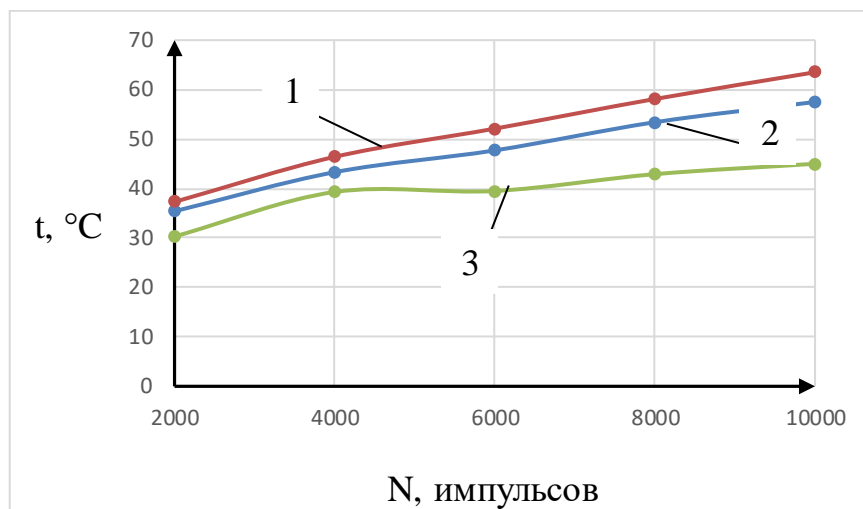
Тенденция изменения температуры представлена от 0 до 10000 импульсов представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Изменение температуры электродов

Подано импульсов	2000	4000	6000	8000	10000
t_1	35,4	43,3	47,7	53,4	57,5
t_2	37,3	46,4	52,1	58,1	63,5
t_3	30,3	39,3	39,5	42,9	45

В таблице t_1 – температура 1 основного электрода, t_2 – температура 2 основного электрода, t_3 – температура поджигающего электрода.

График изменения температуры представлен на рисунке 73.



1 – Электрод 1, 2 – Электрод 2, 3 – Поджигающий электрод

Рисунок 73 – График изменения температуры

Вывод: с ростом числа импульсов температура возрастает практически линейно. Для более точного анализа температуры электродов требуется больше статистических данных.

Заключение

В результате выполнения магистерской диссертации был разработан и сконструирован разрядник, удовлетворяющий требованиям устойчивой работы ГИН в частотном режиме для электроимпульсного бурения. Для реализации управления моментом срабатывания разрядника выбран способ инициирования, основанный на принципе «искажения поля». Выбрана тороидальная форма электродов, позволяющая увеличить ресурс работы разрядника. Расчетное значение ресурса составило порядка $1,2 \cdot 10^6$ – в опыте с ГИН при $I_{\text{макс}} = 12$ кА и $4,5 \cdot 10^6$ – в опыте с разрядной камерой при $I_{\text{макс}} = 5$ кА, что является нормальным показателем. На одном из электродов установлено острие для предыонизации разрядного промежутка, что позволяет уменьшить время запаздывания срабатывания разрядника, тем самым повышая его стабильность работы. Спроектирована и собрана разрядная камера для испытания разрядников на ресурс. Выбран способ охлаждения электродов - продувка поперек канала разряда. Рассчитана скорость продувки – 16 м/с, обеспечивающая охлаждение электродной системы до допустимых температур. Для обеспечения необходимой скорости продувки был выбран канальный вентилятор Elicent АХС 250. Результаты экспериментов показывают, продувка поперек канала разряда позволяет обеспечить более равномерную эрозию электродов. Время запаздывания срабатывания разрядника составило 7,59 нс, что является хорошим показателем стабильности работы. Выбранная форма электродов, принцип инициирования, способ охлаждения позволяют управлять моментом срабатывания, увеличить ресурс работы разрядника, обеспечить быстрое восстановление электрической прочности межэлектродного промежутка, снизить градиент температуры до допустимого и привести к более равномерному износу электродов. В совокупности все элементы системы позволяют увеличивают стабильность работы генератора.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Бугаеву Игорю Владиславовичу

Школа	Новых производственных технологий	Отделение	Материаловедения
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	При проведении научно-исследовательского проекта используется лаборатория высоковольтного зала № 123.3 ИШНПТ ТПУ; в исследовании задействованы два человека: руководитель проекта и студент-дипломник;
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Определение концепции проекта, факторов микро- и макросреды, анализ рынка продукта, экспертная оценка эффективности, SWOT-анализ
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Проект выполняется в рамках магистерской диссертации, устав не требуется.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Отмечены контрольные события проекта; рассчитан бюджет научного исследования;
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Анализ финансовой эффективности, ресурсоэффективности и сравнения эффективностей.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Карта сегментирования рынка
2. Матрица SWOT-анализа проекта
3. Иерархическая структура работ
4. Диаграмма Ганта
5. Смета затрат на научно-исследовательскую работу

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально – гуманитарных наук ШБИП	Старикова Екатерина Васильевна	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Бугаев Игорь Владиславович		

Введение

Целью данного раздела ВКР является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

5.1 Потенциальные потребители результатов НТИ

Потенциальными потребителями данного научно технического исследования являются научно-исследовательские центры, институты и производственные структуры, чьи интересы связаны с импульсной техникой.

Таблица 16 – Карта сегментирования рынка

		Отрасли, связанные с импульсной техникой		
		Научные институты	Внедренческие организации	Заводы-изготовители
Направления развития импульсной техники	Поиск способов повышения ресурса работы разрядников	+	-	+
	Изучение эрозионной стойкости различных металлов	+	-	+
	Серийное изготовление и продажа разрядников	-	-	+
	Изготовление импульсной техники	+	+	+
	Использование данных исследований в области электроэрозионной обработки материалов	+	+	-
	Продажа результатов исследований по увеличению ресурса электродов	+	+	-

Как видно из карты сегментирования, основным сегментом данного рынка являются научные институты, которые выполняют почти весь цикл работ, связанных разработкой разрядников и использованием их в импульсной технике.

5.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Поскольку рынки пребывают в постоянном движении, необходимо систематически проводить детальный анализ существующих конкурирующих разработок. Оценочная карта приведена в таблице 17.

Таблица 17 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Бф	Бк	Кф	Кк
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Безопасность	0,1	3	3	0,3	0,3
Повышение производительности	0,2	5	2	1	0,4
Качество конечного продукта	0,1	5	3	0,5	0,3
Сокращение времени	0,1	5	1	0,5	0,1
Энергоэкономичность	0,2	4	1	0,8	0,2
Экономические критерии оценки эффективности					
Конкурентоспособность продукта	0,1	5	2	0,5	0,2
Цена	0,1	2	4	0,2	0,4
Уровень проникновения на рынок	0,1	3	5	0,3	0,5
Итого	1	32	21	4,1	2,4

Анализ показал, что технические как и экономические критерии данного проекта на нынешний момент развития может заинтересовать покупателей. Так же получилось определить критерии с которыми надо провести работы для более выигрышного положения на рынке.

5.3 Иерархическая структура работ

Содержание работ данного проекта определено и структурировано в виде иерархии, которая приведена на рисунке 74.

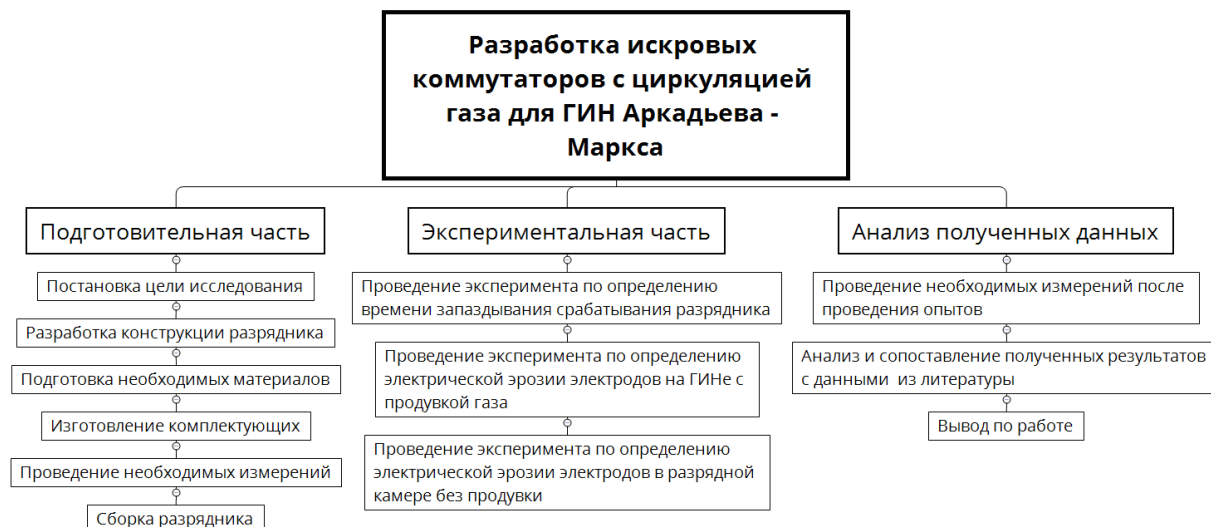


Рисунок 74 - Иерархическая структура работ

5.4 SWOT – анализ

SWOT – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT- анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта

Таблица 18 – SWOT – анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Новая установка для проведения лабораторных работ. С2. Увеличение ресурса и стабильности работы коммутаторов</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Конструкция коммутатора и принцип работы не являются новыми. Есть исследования со схожими коммутаторами. Сл2. Требуется дополнительный персонал со знанием электроники для реализации данного способа коммутации</p>
--	---	---

Продолжение таблицы 18

	С3. Создание установки из уже имеющихся комплектующих С4. Возможность использования разработки в высоковольтной технике различного назначения	Сл3. Не разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки.
Возможности: В1. Сокращение временных затрат В2. Применение для собственных нужд высоковольтного зала В3. Частичное использование установки для проведения других исследований В4. Публикации в научных журналах.	При совмещении сильных сторон и возможностей НИР улучшается энергоэффективность и производительность	Для проведения исследований и проведению экспериментов необходим персонал с определенным уровнем подготовки и знаний.
Угрозы: У1.Отсутствие кадров для продолжения научно-исследовательской работы. У2. Недостаток теоретических знаний. У3. Недостаточное финансирование.	Монтаж и эксплуатация измерительного модуля не требуют значительных затрат.	В случае отсутствия кадров для продолжения научно-исследовательской работы невозможно будет подготовить оборудование к проведению испытаний.

Анализируя данные можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и возможностей: В1С1С2С3, В2С1С2С3, В3С1С4, В4С4, коррелирующие слабых сторон и возможностей: В3Сл2, коррелирующие сильных сторон и угроз: У2С4, У3С4, коррелирующие слабых сторон и угроз: У1Сл2, У2Сл2, У3Сл3.

5.5 Планирование комплекса работ на создание проекта

Определение трудоемкости и продолжительности работ осуществляется на основе отраслевых нормативов, типовых норм на разработку конструкторской документации, а для работ, обладающих большой

неопределенностью на основе вероятностных (экспертных) методов, широко используемых в СПУ

Таблица 19 – Перечень работ и распределение исполнителей

№ работы	Содержание работ	Должность исполнителя
1	Составление и утверждение задания НИР	РП, СД
2	Изучение поставленной задачи и поиск материалов по теме	СД
3	Определение последовательности этапов разработки	РП, СД
4	Описание установки и методики исследования	РП, СД
5	Календарное планирование работ	РП, СД
6	Приобретение необходимых материальных ресурсов для осуществления проекта	РП, СД
7	Разработка конструкции разрядника	РП, СД
8	Разработка конструкторской документации, утверждение и заказ в опытно-конструкторском цехе	РП, СД
9	Реализация установки	РП, СД
10	Оптимизация режима работы установки	РП, СД
11	Диагностика и анализ полученных результатов	РП, СД
12	Составление отчета	СД

РП – руководителя проекта, СД – студент-дипломник.

На основании перечисленных работ для удобства был построен календарный план-график (см. рисунок 75) с длительность этапов в календарных днях.



Рисунок 75 - Линейный план - график реализации проекта

5.6 Определение трудоемкости работ

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5} \quad (13)$$

где $t_{ож}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения работы, чел.-дн.;

t_{min} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы чел.-дн.;

t_{max} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы чел.-дн.

Рассчитаем значение ожидаемой трудоёмкости работы:

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_p = t_{ож} / Ч \quad (14)$$

где T_p – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_k = T_p \cdot k \quad (15)$$

где T_k – продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

T_p – продолжительность одной работы, раб. дн.;

k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{кг}}{T_{кг} - T_{вд} - T_{пд}} \quad (16)$$

где $T_{кг}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вд}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пд}$ – количество праздничных дней в году.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k = \frac{T_{кг}}{T_{кг} - T_{вд} - T_{пд}} = \frac{365}{365 - 104 - 10} = 1,45,$$

тогда длительность этапов в рабочих днях, следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ T_k нужно округлить до целых чисел.

Результаты расчетов приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Временные показатели проведения ВКР

№ раб.дн.	Исп-ли					
		t_{\min} , чел-дн	t_{\max} , чел-дн	$t_{ож}$, чел-дн	T_p , раб.дн	T_k кал.дн
1	РП, СД	4	10	6,4	3,2	5
2	СД	4	8	6,6	6,6	10
3	РП, СД	10	14	11,6	5,8	8
4	РП, СД	10	18	13,2	6,6	10
5	РП, СД	7	17	11	5,5	8
6	РП, СД	16	20	17,6	8,8	13
7	СД	12	16	13,6	6,8	10
8	РП, СД	12	27	18	9	13
9	РП, СД	10	25	16	8	12
10	РП, СД	8	20	12,8	6,4	9
11	РП, СД	6	20	11,6	5,8	8
12	СД	4	10	6,4	6,4	9
Итого						115

Таким образом, в проектной деятельности участвуют двое сотрудников: руководитель проекта и студент-дипломник.

5.7 Расчет сметы затрат на проектирование

5.7.1 Бюджет научного проекта

При планировании бюджета научного проекта включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки.

5.7.2 Расчет материальных затрат

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Расчет стоимости материальных затрат произведен в таблице 21.

Таблица 21 – Расходные материалы

Наименование материала	Цена, руб	Количество, шт	Общая стоимость, руб
Конденсатор ИК 100-0,4	10000	1	60000
Труба из полипропилена	500	1	1000
Латунь для держателя поджигающего электрода	100	1	100
Сталь 12Х18Н10Т для дискового электрода	100	1	100
Генератор запуска импульсов (готовый)	4000	1	40000
Манометр	2000	1	2000
Металлическая труба	115	1	115
Шаровой кран	173	3	519
Болты	8	30	240
Резисторы	145	2	290
Сталь 12Х18Н10Т для основных электродов	100	4	1000
Заготовки на электроды ЭРХ30Д70-МП ф48х6 мм	408	2	816
В70Д30-МП ф48х4	776	2	1552
Итого			107732

Примечание: Стоимость материалов определены по среднерыночным ценам по России на 09.04.2018 г.

5.7.3 Расчет оплаты труда работников

Данный пункт расходов включает заработную плату научного руководителя, техника, а также премии, входящие в фонд заработной платы.

Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Данные для расчета:

- 1) Оклад: научного руководителя – 30 000 руб (рк)., техника 2200 руб.
(рк)
- 2) Плановый фонд рабочего времени за месяц – 176 часов (22 дня);
- 3) Тарифная ставка.
- 4) Дополнительная заработная плата.
- 5) Районный коэффициент (1,3).

Часовая тарифная ставка ($C_{ч}$) определяется:

$$C_{ч} = \frac{\text{Оклад}}{\Phi_{рв}} \quad (17)$$

где $\Phi_{рв}$ – плановый фонд рабочего времени за месяц у техника, из расчета 22 рабочих дня по 8 часов.

Определяем заработную плату за час для техника:

$$C_{ч} = \frac{2200}{176} = 12,5 \text{ руб. в час}$$

Основная заработная плата техника за месяц составит:

$$\begin{aligned} ЗП_{осн} &= C_{ч} * t & (18) \\ ЗП_{осн} &= 12,5 \cdot (22 \cdot 8) = 12,5 \cdot 176 = 2200 \text{ руб;} \end{aligned}$$

Дополнительная заработная плата:

$$\begin{aligned} ЗП_{доп} &= \frac{ЗП_{осн} * 15}{100} & (19) \\ ЗП_{доп} &= \frac{2200 * 15}{100} = 330 \text{ руб} \end{aligned}$$

Итого затраты на оплату труда:

$$\begin{aligned} ЗП_{общ} &= ЗП_{осн} + ЗП_{доп} & (20) \\ ЗП_{общ} &= 2200 + 330 = 2530 \text{ руб} \end{aligned}$$

Теперь рассчитаем заработную плату научного руководителя:

Часовая тарифная ставка ($C_{ч}$):

$$C_{ч} = \frac{30000}{176} = 170,4 \text{ руб. в час}$$

где $\Phi_{рв}$ – плановый фонд рабочего времени за месяц у руководителя, из расчета 22 рабочих дня по 8 часов.

Основная заработная плата за проект у руководителя составит:

$$ЗП_{\text{осн}} = 170,4 \cdot (22 \cdot 8) = 29990,4 \text{ руб};$$

Дополнительная заработная плата:

$$ЗП_{\text{доп}} = \frac{29990,4 \cdot 15}{100} = 4498,56 \text{ руб}$$

Итого затраты на оплату труда:

$$ЗП_{\text{общ}} = 29990,4 + 4498,56 = 34488,96 \text{ руб}$$

Тогда, сумма заработных плат составит:

$$ЗП_{\text{общ}} = 34488,96 + 2530 = 37018,9 \text{ руб}$$

Таблица 22 – Расчет заработной платы участников проекта

Исполнитель	Оклад (руб.)	Часовая тарифная ставка (руб./час.)	Основная зар.плата (руб.)	Дополнительная зар. плата (руб.)
Руководитель	30000	170,4	30000	4498,56
Студент – дипломник	2200	12,5	2200	330
Итого	37018,9 руб			

Так же для реализации проекта приходилось пользоваться услугами других сотрудников (см. таблицу 23).

Таблица 23 – Расчет оплаты дополнительных услуг

Исполнитель	Часовая тарифная ставка (руб./час.)	Затраченное время на работу, час.	Оплата за сделанную работу, руб.
Токарь	250	5	1250
Итого			1250

5.7.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{\text{соц}} = K_{\text{соц}} \cdot C_{\text{осн}} \quad (21)$$

где $K_{\text{соц}}$ – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 27,1% от затрат на заработную плату и включает в себя:

- 1) отчисления в пенсионный фонд;
- 2) на социальное страхование;
- 3) на медицинское страхование.

Итого, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{\text{соц}} = 0,27 \cdot 37018,9 = 9994,86 \text{руб.}$$

5.7.5 Затраты электроэнергии

Затраты на электроэнергию в денежном выражении рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{эл}} = W_{\text{сил эн}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (22)$$

где $C_{\text{э}}$ – стоимость одного кВт·часа электроэнергии. $C_{\text{э}}$ - одноставочный тариф на потребляемую электроэнергию составляет 3,1 руб/кВт·ч для ТПУ.

Таблица – 24 Затраты электроэнергии

Наименование статьи	Затраты электроэнергии, кВт·ч.	Тариф электроэнергии, руб/кВт·ч	Затраты на электроэнергию, руб.
Монтажные работы	50	3,1	155
Пуско-наладочные работы	10	3,1	31
Освещение рабочего места	160	3,1	496
Использование ручного электроинструмента	85	3,1	263,5
Итого			945,5

5.7.6 Накладные расходы

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Таким образом, накладные расходы равны: $Z_{\text{накл}} = 27350 \cdot 0,16 = 4376$ руб.

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта (см. таблицу 25)

Таблица 25 – Расчет бюджета затрат НТП

Наименование статьи	Сумма, руб.
Расходные материалы НТИ	107732
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	47993,088
Отчисления во внебюджетные фонды	14397,9
Накладные расходы	4376
Затраты электроэнергии	945,5
Бюджет затрат НТП	175444,488

Выводы

В текущем разделе был выполнен следующий алгоритм:

- анализ и оценка научно-технического уровня проекта, который показал, что данный проект имеет среднюю значимость теоретического и практического уровня.

- SWOT-анализ выявил наиболее важные проблемы, которые необходимо разрешить в процессе выполнения проекта. Одной из такой проблемы является привлечение в команду высококвалифицированных экономистов и маркетологов.

- разработан календарный план проекта (таблица 19) и построен календарный план-график (рисунок 75). В проектной деятельности участвуют двое сотрудников: руководитель проекта и студент-дипломник.

- определена трудоемкость работ, которая составила 115 календарных дней (таблица 20).

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Бугаеву Игорю Владиславовичу

Школа	ИШНПТ	Отдел школы	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>1. Объект исследования – разработка искровых коммутаторов с циркуляцией газа для генератора импульсных напряжений (ГИН) Аркадьева-Маркса.</p> <p>2. Метод исследования – создание модели разрядника, работа с лабораторным стендом по испытанию разрядника на ресурс;</p> <p>3. Рабочая зона – высоковольтный зал корпуса №1 ИШНПТ ТПУ, помещение для работ по сборке установки является 122.2 аудитория, исследовательские и экспериментальные работы ведутся высоковольтном зале.;</p> <p>4. Область применения – высоковольтная импульсная техника, лаборатории.</p>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты) 	<p>1.1 Вредные факторы рабочей зоны:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Недостаточная освещенность рабочей зоны: Световой поток от каждой лампы составляет 2400 лк. Произведен расчет рекомендуемого светового потока, который составляет 2773 лк. Выбраны лампы ЛХБ40 с потоком 3100 лк. - Высокий уровень шума от работы электроустановок в лаборатории: Уровень шума в рабочей зоне составляет 70 дБ. предельный допустимый уровень звукового давления для данного типа помещения составляет 60 дБ. В качестве индивидуального средства защиты применяются противозумные наушники СОМЗ-3. - Электромагнитное излучение в рабочей зоне: Энергетическая экспозиция в диапазоне частот 30 кГц – 3 МГц: По эл-ой составляющей $E_{\Sigma} = 5100 \left(\frac{B}{M}\right)^2 \cdot ч$, по ПДУ $E_{\Sigma} \leq 20000 \left(\frac{B}{M}\right)^2 \cdot ч$. По магнитной составляющей $H_{\Sigma} = 260 \left(\frac{A}{M}\right)^2 \cdot ч$, по ПДУ $H_{\Sigma} \leq 200 \left(\frac{A}{M}\right)^2 \cdot ч$. Применяемые средства защиты: экранирование, заземляющая штанга, все металлические объекты стенда, находящиеся под напряжением, заземлены. <p>1.2 Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Повышенное значение напряжение до 50 кВ, повышенное значение электрического тока до 4 кА. Источники: разрядник, а также все токоведущие части установки.
---	---

	<p>Применяемые средства защиты от поражения электрическим током: установка ограждений и барьеров, размещение вне зоны досягаемости, изоляция токоведущих частей, защитное заземления, уравнивание потенциалов, все сотрудники лаборатории проходят соответствующие инструктажи, имеют группу допуска по электробезопасности не меньше второй.</p> <p>- Источники механических опасностей, какие-либо движущиеся механизмы отсутствуют.</p> <p>- Источник термической опасности – держатели электродов, которые нагреваются при протекании разрядного тока. Поэтому опыты проводились до температуры нагрева держателей до 60 °С. Измерение температуры проводилось тепловизором после каждой серии из 10000 импульсов.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> - защита селитебной зоны - анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); - анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); - анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); - разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>2.1 Селитебная зона установки находится на территории высоковольтного зала корпуса №11 ИШНПТ ТПУ.</p> <p>2.2 Возможно попадание газа наполнителя в атмосферу при нарушении герметичности разрядной камеры:</p> <p>Меры защиты: разрядная камера, в которую накачивается газ имеет герметичную конструкцию, которая не позволяет газу попасть в атмосферу. Помимо этого, объем камеры с газом мал и составляет 0,0019 м³.</p> <p>Индивидуальные меры защиты: костюм хлопчатобумажный, резиновые перчатки.</p> <p>2.3 Воздействие установки на литосферу и гидросферу исключено, т.к. отсутствуют выбросы продуктов работы установки в литосферу и гидросферу. Отходы в виде отработанных конденсаторных батарей утилизируются на специализированных заводах.</p> <p>2.4 Экологическая безопасность отражена в документе СанПиН 2.2.4.1329-03 «Требования по защите персонала от воздействия импульсных электромагнитных полей»</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> - перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; - выбор наиболее типичной ЧС; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>3.1 Перечень возможных ЧС: возгорание оборудования, короткое замыкание электрической цепи;</p> <p>В качестве наиболее вероятной ситуации рассматривается пожар.</p> <p>3.2 Превентивные меры по предупреждению возгорания: соблюдать требования безопасности при работе в помещении, очищать помещения от горючих отходов и мусора, проводить проверки состояния узлов установки, а также электрической цепи установки, не допускать длительного проведения эксперимента и периодически следить за температурой</p>

	<p>оборудования, , не реже одного раза в полугодие проводить практические тренировки всех задействованных для эвакуации работников, обучение лиц мерам пожарной безопасности путем проведения инструктажа по пожарной безопасности (вводный, первичный, повторный - два раз в год).</p> <p>3.3 Действия при возникновении ЧС: прекратить все работы в здании, незамедлительно оповестить пожарную охрану по телефону, принять возможные меры по ликвидации последствий ЧС: эвакуация людей, тушение пожара, в случае угрозы жизни людей немедленно организовать их спасение.</p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Правовые и организационные вопросы отражены в документе СанПиН 2.2.4.1329-03 «Требования по защите персонала от воздействия импульсных электромагнитных полей»</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения контроля и диагностики ИШНКБ	Ахмеджанов Рафик Равильевич	д.б.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Бугаев Игорь Владиславович		

Введение

Данный раздел ВКР посвящен выполнению анализа и разработке мер по обеспечению благоприятных условий труда в рабочей зоне. Рабочей зоной является высоковольтный зал корпуса №11 ИШНПТ ТПУ, помещение для работ по сборке установки является 122.2 аудитория, исследовательские и экспериментальные работы ведутся высоковольтном зале.

6.1 Производственная безопасность

6.1.1 Анализ опасных и вредных факторов

При работе в кабинете персонал может столкнуться с воздействием физически опасных и вредных производственных факторов [28].

Таблица 26 - Вредные и опасные факторы

Наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74 [28])		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Создание модели конструкции разрядника, испытание разрядника на ресурс	1. Недостаточная освещенность помещения 2. Повышенный уровень шума на рабочем месте 3. Наличие электромагнитных полей	1. Электрический ток	СанПиН 2.2.4.548-96.[29]; ГОСТ 12.1.003-83.[30]; ГОСТ 12.1.019.[31]; ГОСТ 12.1.038 – 82.[32]

Неблагоприятные условия микроклимата

Согласно [29] работа в кабинете относится к классу работ с интенсивностью энергозатрат 120 - 150 ккал/час. В помещениях, где работа с персональной электронной вычислительной машиной является основной, должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата для категории работ 1а и 1б в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами микроклимата производственных помещений (см. таблицу 27).

Таблица 27 – Параметры микроклимата для производственных помещений

Период года	Параметр микроклимата	Величина
Холодный	Температура воздуха в помещении	22 – 24 °С
	Относительная влажность	40 – 60 %
	Скорость движения воздуха	до 0,1 м/с
Теплый	Температура воздуха в помещении	23 – 25°С
	Относительная влажность	40 – 60 %
	Скорость движения воздуха	0,1 – 0,2 м/с

С целью поддержания параметров микроклимата в допустимых пределах, а также комфортные условия работы обслуживающего персонала применяется кондиционирование воздуха.

Повышенный уровень шума

Другим вредным фактором, оказывающим пагубное воздействие на здоровье человека, является шум [33]. Уровень шума в рабочей зоне составляет 72 дБ.

В качестве средств индивидуальной защиты применяются противошумные наушники СОМЗ-3 ПУМА. Наушники предназначены для защиты органа слуха от шума с уровнем не более 115 дБ (SNR = 30 дБ). Группа А.



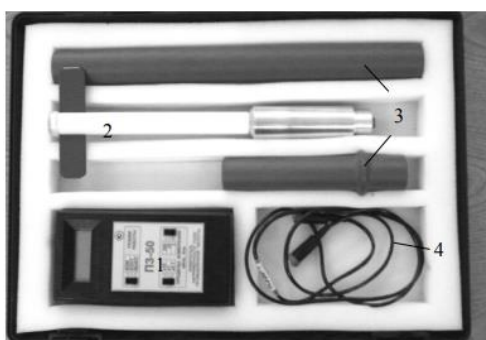
Рисунок 76 - наушники СОМЗ-3

Электромагнитное излучение

Так как проведение испытаний разрядника на ресурс сопровождается наличием высокого напряжений и протеканием импульсного тока,

следовательно, на персонал действует электромагнитное излучение. Измерение уровня электромагнитного излучения, её электрической и магнитной составляющей производится с помощью следующих устройств:

1) Измеритель напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50А (рисунок 77) предназначен для измерения среднеквадратичного значения напряженности электрического поля промышленной частоты, возбуждаемого вблизи электроустановок высокого напряжения в диапазоне от 0,01 до 100 кВ/м.



1– устройство отсчетное УОЗ-50; 2– антенна преобразователь ЕЗ-50;
3– изоляционные ручки; 4– соединительный кабель.

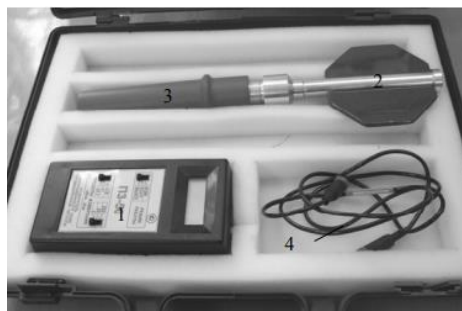
Рисунок 77 - Внешний вид прибора ПЗ-50А.

2) Измеритель напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50Б (рисунок 78) предназначен для измерения среднеквадратичного значения напряженности магнитного поля промышленной частоты, возбуждаемого вблизи электроустановок высокого напряжения в диапазоне от 0,1 до 1800 А/м.

Измерения энергетической экспозиции показали следующие результаты:

- По эл-ой составляющей $\text{ЭЭе} = 5100 \left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)^2 \cdot \text{ч}$, по ПДУ $\text{ЭЭе} \leq 20000 \left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)^2 \cdot \text{ч}$.

- По магнитной составляющей $\text{ЭЭн} = 260 \left(\frac{\text{А}}{\text{м}}\right)^2 \cdot \text{ч}$, по ПДУ $\text{ЭЭн} \leq 200 \left(\frac{\text{А}}{\text{м}}\right)^2 \cdot \text{ч}$.



- . 1– устройство отсчетное УОЗ-50; 2– антенна преобразователь НЗ-50;
3– изоляционная ручка; 4– соединительный кабель.

Рисунок 78 - Внешний вид прибора ПЗ-50Б

Лабораторный стенд находится в специально отведенном для испытаний месте, огороженном сетчатым ограждением, которое является экраном. Так как величина электромагнитного излучения незначительна, нет необходимости в использовании дополнительных средств коллективной и индивидуальной защиты.

Источником электромагнитных излучений в лаборатории также является дисплей ПЭВМ (см. таблицу 28).

Таблица 28 – Средства защиты от излучений оптического диапазона и электромагнитных полей ПЭВМ

№	Средство профилактики неблагоприятного влияния ПЭВМ	Оказываемое профилактическое действие
1	Приэкранные защитные фильтры для видеомониторов	Снижают уровень напряженности электрического и электростатического поля, повышают контрастность изображения, уменьшают блики.
2	Нейтрализаторы электрических полей промышленной частоты	Снижают уровень электрического поля промышленной частоты (50 Гц)
3	Очки защитные со спектральными фильтрами ЛС и НСФ, разрешенные Минздравом России для работы с ПЭВМ	Профилактика компьютерного зрительного синдрома, улучшение визуальных показателей видеомониторов, повышение работоспособности, снижение зрительного утомления

Согласно [34] напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50см вокруг видеодисплейного терминала (ВДТ) не должна превышать 25В/м в диапазоне от 5Гц до 2кГц; 2,5В/м в диапазоне от 2 до 400 кГц. Плотность магнитного потока не должна превышать в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц 250нТл, и 25нТл в диапазоне от 2 до 400кГц. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В [32].

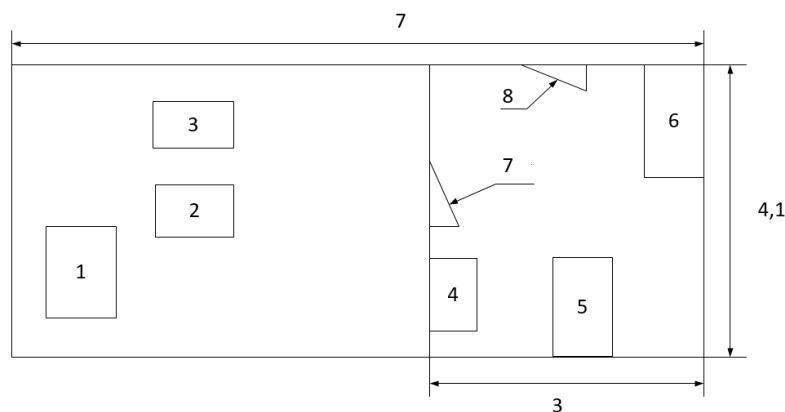
Согласно [35] конструкция ВДТ и ПЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от корпуса не более 0,1 мбэр/ч(100мкР/ч). Предел дозы облучения для работников ВЦ (операторы, программисты) составляет 0,5 бэр/год.

Недостаточное освещение на рабочем месте

В кабинете лаборатории в настоящий момент применяются лампы с недостаточным световым потоком ($F = 2600$ лм).

Освещенность рабочей поверхности должна составлять 300-500 лк [36]. Коэффициент пульсации освещенности не более 15 %. Коэффициент естественной освещенности КЕО в кабинетах и рабочих комнатах должен быть не ниже 1%. –при боковом освещении и 3% – при верхнем или комбинированном освещении. Коэффициент совмещенной освещенности КЕО в кабинетах и рабочих комнатах должен быть не ниже 0,6%. –при боковом освещении и 1,8% – при верхнем или комбинированном освещении

Произведем расчет искусственного освещения для рабочего кабинета (см. рисунок 79), в котором производится испытание разрядника на ресурс.



- 1 – источник выпрямленного высокого напряжения;
 2 – разрядная камера; 3 – конденсатор; 4 – пульт управления;
 5, 6 – вспомогательный рабочий стол; 7, 8 – входная дверь

Рисунок 79 – Обстановка рабочей зоны.

Кабинет имеет следующие размеры: ширина – 4,1 м; длина – 7 м; высота – 3 м; площадь 28,7 м².

Порядок расчёта:

- 1) выбор типа светильников,
- 2) определение количества светильников,
- 3) определение мощности источников света.

В помещении предусмотрено общее равномерное освещение, для которого применяются люминесцентные лампы типа ЛХБ (лампы холодно-белого цвета), для которых используется светильник типа ШОД-2-40 (длиной 1228 мм, шириной 284 мм). Размещение светильников в помещении определяется следующими размерами [37]:

$H = 3$ м – высота помещения;

$h_c = 0,2$ м – расстояние светильников от перекрытия (свес);

h_n – высота светильника над полом, высота подвеса;

h_p – высота рабочей поверхности над полом;

h – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью

$$(h = h_n - h_p);$$

L – расстояние между соседними светильниками или рядами;
 l – расстояние от крайних светильников или рядов до стены
(оптимальное расстояние / рекомендуется принимать равным $L/3$);
 λ – интегральный критерий оптимальности расположения
светильников.

Высота подвеса составляет:

$$h_n = H - h_c = 3 - 0,2 = 2,8 \text{ м.}$$

Учитывая, что $h_p = 1$ м, найдём $h = h_n - h_p = 2,8 - 1 = 1,8$ м.

Для светильников типа ШОД $\lambda = 1,1$, поэтому

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 1,8 = 1,98 \text{ м;}$$

$$l_a = \frac{L}{3} = \frac{1,98}{3} = 0,66 \text{ м;}$$

$$l_b = \frac{4 - 2 \cdot 0,284 - 1,98}{2} = 0,726 \text{ м.}$$

На основе данных расчетов рекомендуется разместить светильники в 2 ряда, в каждом из которых можно установить 3 светильника типа ШОД-2 мощностью 40 Вт (см. рисунок 80). При этом интервал между светильниками в ряду составят примерно 0,998 м. Учитывая, что в каждом светильнике установлено по две лампы, общее число ламп в помещении составит $(2 \cdot 3) \cdot 2 = 12$.

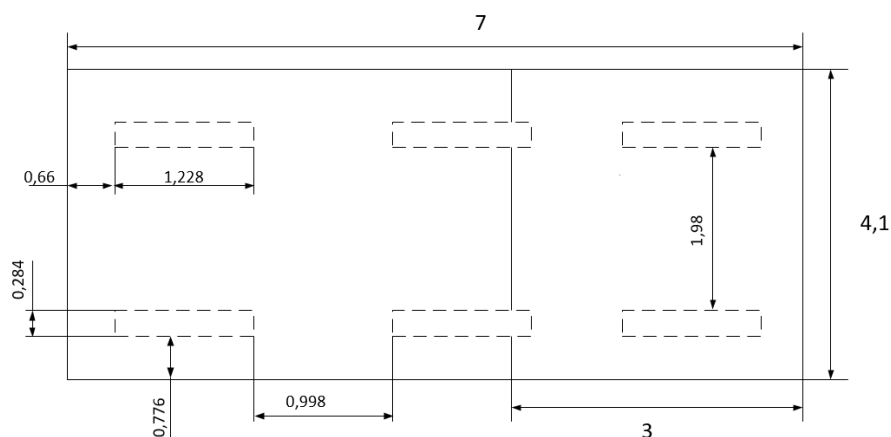


Рисунок 80 – План помещения и размещения светильников (размеры указаны в метрах)

Расчет общего равномерного освещения выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отраженный от потолка и стен. Световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$F = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot \eta}, \quad (23)$$

где E_n – нормируемая минимальная освещенность (для данной категории помещений $E_n=300$ лк) [37];

S – площадь освещаемого помещения (20 м²);

K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, запыленность ($K_3 = 1,5$ - для помещений с малым выделением пыли);

Z – коэффициент неравномерности освещения (для люминесцентных ламп берется равным 1,1);

n – число ламп (8);

η – коэффициент использования светового потока – показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен p_c и потолка p_n .

Расчет индекса помещения осуществляется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (a + b)}, \quad (24)$$

где S – площадь помещения (28,7 м²);

h – высота подвеса светильников над рабочей поверхностью (1,8 м);

a, b – длина и ширина помещения ($a = 7$ м; $b = 4,1$ м).

В результате $i = \frac{28,7}{1,8 \cdot (7+4,1)} = 1,436$.

Коэффициенты отражения p_c и p_n имеют следующие значения [37]:

- $p_c = 50\%$ (стены свежепобеленные с окнами без штор);
- $p_n = 70\%$ (потолок свежепобеленный).

Для полученных значений p_c , p_n и i коэффициент использования светового потока $\eta = 42,72\%$, или $\eta = 0,427$. Подставляя полученные значения в формулу, найдем значение минимально требуемого светового потока для рабочей аудитории:

$$F = \frac{300 \cdot 28,7 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,427} = 2773 \text{ лм}$$

Рассчитав световой поток F , зная тип лампы, выберем ближайшую стандартную лампу и определим электрическую мощность всей осветительной системы. Ближайшая стандартная лампа – ЛХБ40 Вт с потоком 3100 лм [37]. Напряжение сети 220 В. По результатам данного расчета можно сделать следующий вывод: согласно [36] в рабочей аудитории (размерами 7 х 4,1 х 3 м) со свежепобеленными потолком и стенами, с окнами без штор следует использовать 4 светильника типа ШОД-2-40 с люминесцентными лампами ЛХБ мощностью 40 Вт с потоком 3100 лм.

6.1.2 Анализ опасных производственных факторов

В данной работе опасным производственным фактором является электрический ток. Для обеспечения безопасности и полного исключения возможности поражения электрическим током, установка находится в специально отведенном месте за сетчатым ограждением, доступ к которому можно получить только лишь вытянув защитную задвижку.

Для защиты от поражения электрическим током в нормальном режиме должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты от прямого прикосновения [38]:

- основная изоляция токоведущих частей;
- получение персоналом соответствующей группы электробезопасности;
- ограждения и оболочки;
- установка барьеров;
- размещение вне зоны досягаемости;

Для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты при косвенном прикосновении: защитное заземление; автоматическое отключение питания; уравнивание потенциалов; двойная или усиленная изоляция; защитное электрическое разделение цепей; изолирующие (непроводящие) помещения, зоны, площадки.

Применение двух и более мер защиты не должно оказывать взаимного влияния, снижающего эффективность каждой из них.

6.2 Экологическая безопасность

Селитебная зона установки находится на территории высоковольтного зала корпуса №11 ИШНПТ ТПУ.

В данной работе испытание разрядника на ресурс происходит в специально сконструированной разрядной камере, в которую накачивается азот. Объем камеры небольшой и составляет 0,0019 м³. Накачка газа происходит до эксперимента в специально отведенном месте. Спуск после проведения серии испытаний на открытом воздухе.

Испытание разрядника на ресурс не сопровождается значительными энергозатратами, что также положительно сказывается в экологической плане. Работа установки сопровождается минимальным выделением тепла. Часть энергии тратится на нагрев электродов, остальное выделяется в канале разряда.

Работа установки не влечет за собой какое-либо негативное воздействие на окружающую среду.

6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является пожар [41]. Помещение лаборатории относится к категории В4, так как в ней происходят работы с электрическими разрядами. Искрение контактов, короткое замыкание может привести к воспламенению. [42]).

Системы противопожарной защиты здания должны обеспечивать возможность эвакуации людей в безопасную зону до наступления предельно допустимых значений опасных факторов пожара.

Все помещения лаборатории должны соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-91 [41].

Оповещение людей о пожаре, управление эвакуацией людей и обеспечение их безопасной эвакуации при пожаре в здании должны осуществляться одним из следующих способов или комбинацией следующих способов: подача световых, звуковых и (или) речевых сигналов, размещение и обеспечение освещения знаков пожарной безопасности на путях эвакуации; включение эвакуационного (аварийного) освещения; дистанционное открывание запоров дверей эвакуационных выходов и др. [42].

Выводы

Основным фактором, влияющим на производительность людей, работающих в закрытом помещении, являются комфортные и безопасные условия труда. Условия труда сотрудников в рабочей комнате характеризуются возможностью воздействия на них следующих производственных факторов: шума, тепловыделений, действие микроклимата, недостаточной освещённости, параметров технологического оборудования и рабочего места.

Таким образом, в данном разделе были проанализированы вредные и опасные факторы, влияющие на здоровье человека в закрытом помещении. Были отмечены источники негативного воздействия, приведены допустимые нормы с необходимой размерностью, а также средства коллективной и индивидуальной защиты.

Список публикаций студента

1. Бугаев И. В., Юдин А. С. Преимущества использования электроимпульсного способа разрушения горных пород над традиционными методами // Энергетика в современном мире: сб. ст. VIII Междунар. заочной науч. - практ. конф. – Чита: ЗабГУ, 2017. - С. 115-120.
2. Бугаев И. В. Электроимпульсный способ бурения горных и вечномёрзлых пород // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Междунар. науч. – практ. Конф. – Тюмень: ТИУ, 2017. – Т. 1. - С. 31-34.

Список использованных источников

- 1 Важов В. Ф., Зиновьев Н.Т., Ушаков В. Я. Электроразрядная технология бурения скважин и разрушения железобетонных изделий: монография; под ред. В.Я. Ушакова; – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 312 с.
- 2 Справочник по электротехническим материалам: в 3 т. / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – Т.1. - 368 с.
- 3 Смирнов С. М., Терентьев П. В. Генераторы импульсов высокого напряжения. - М.-Л.: «Энергия», 1964. - 240 с.
- 4 Сиротинский Л. И. Техника высоких напряжений. - М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1951. - 294 с.
- 5 Авруцкий В.А. Кужекин И. П., Чернов Е. Н. Испытательные и электрофизические установки. Техника эксперимента. - М.: МЭИ, 1983. – 264 с.
- 6 Блум Х. Схемотехника и применение мощных импульсных устройств; пер. с англ. А. М. Рабодзея. – М. : Додэка-XXI, 2008. – 352 с.
- 7 Крастелев Е. Г. Калинин Ю. Г., Черненко А. С. Усовершенствованный разрядник для генераторов импульсного напряжения установки «СТЕНД – 300 // ПТЭ. - 2014. - №2 – С. 35-42.
- 8 Быков Н.М. Гунин А. В. Коровин С. Д. Особенности работы высоковольтного газового коммутатора с прокачкой газа поперек канала пробоя в импульсно – периодическом режиме. ПТЭ. - 2008. - №6 – С. 63-71.
- 9 Импульсные водородные тиратроны [Электронный ресурс]– Режим доступа: http://www.kontakt-saratov.ru/tiratron/teh_harakter-tiratron/ (дата обращения: 21.12.2017)
- 10 Сильноточные разрядники низкого давления с холодным катодом (псевдоискровые разрядники) – Институт сильноточной электроники

- СО РАН [Электронный ресурс]– Режим доступа: <http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/technologies/tech15.html> (дата обращения: 21.12.2017)
- 11 ВЭИ-АВИС [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://vei-avis.ru/index.php/tablica> (дата обращения: 15.12.2017).
- 12 Основные технические характеристики высоковольтных газовых управляемых разрядников [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.rustechgroup.ru/rus/rg_table.htm (дата обращения: 6.02.2017)
- 13 Физика и техника мощных импульсных систем / под ред. Е.П. Велихова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Ч. 1. – 352с.
- 14 Киселев Ю. В., Черепанов В.П. Искровые разрядники. М.: «Советское радио», 1976. - 72 с.
- 15 Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Комельков В.С., Дашук П.М., Зайенц С.Л., Кучинский Г.С., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А., Н.Н. Николаевская; Под ред. В.С. Комелькова; - М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
- 16 Воробьев Г.А., Месяц Г.А. Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. М.: Госатомиздат, 1963. – 168 с.
- 17 Кичаева Г.С., Шкуропат П.И. Об эрозии металлических электродов при коммутации больших импульсных токов // Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция: сб. докл. межвуз. науч. – практ. конф. – М.: «Энергия», 1970. С. 176 - 182.
- 18 Долгов Г.Г., Мандельштам С.Л. Плотность и температура газа в искровом разряде // Журнал технической физики. - №6, - 1953. – С. 53-59.
- 19 Мак А.А. О температуре канала искрового разряда в воздухе // Оптика и спектроскопия. - №2. - 1960. С. 116 – 121.
- 20 Буткевич Г. В., Белкин Г. С., Ведешенков Н. А., Жаворонков М. А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. – М.: Энергия, 1978. – 256 с.

- 21 Комельников В.С., Парфенов Д.С. Расширение канала искры в воздухе при токах около $2 \cdot 10^6$ А // Доклады технической физики. - №8. - 1960. С. 95 – 101.
- 22 Семин Б.Н., Хмыров В.В. Мощный искровой разрядник с большой частотой срабатывания // Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция: сб. докл. межвуз. науч. – практ. конф. – М.: «Энергия», 1970. С. 464 - 467.
- 23 Ковальчук Б.М., Королев Ю.Д., Кумпяк Е.В. Стабильность срабатывания частотного разрядника в режиме самопробоя при напряжении до 300 kV и коммутируемой энергии до 450 Дж // Журнал технической физики. - 2014. - Т.84. - №15 – С.137-144.
- 24 Разрядник [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/151/1510655.html> (дата обращения: 5.01.2017).
- 25 Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Поталицин Ю.Ф. Искровой разрядник для включения конденсаторов в мощных конденсаторных батареях // Приборы и техника эксперимента. - 1968. - №6. - С 161-164.
- 26 Канальный вентилятор Elicent ACX 250 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.vents-market.ru/index.php?route=product/product&path=20&product_id=153 (дата обращения: 10.05.2017)
- 27 ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.
- 28 ГОСТ 12.1.003-74. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- 29 Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548-96. "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений"
- 30 ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
- 31 ГОСТ 12.1.019 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

- 32 ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
- 33 СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
- 34 ГОСТ 12.1.002 – 84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах
- 35 Гигиенические требования к электронно-вычислительным машинам и организации работы. Санитарные правила и нормы 2.2.2 2.4.1340 – 03. – М., 2003
- 36 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 – Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий
- 37 Расчет искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - 15 с.
- 38 Правила устройства электроустановок. – Москва: КноРус, 2017. – 488 с. – Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2017 г.;
- 39 Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 13.07.2015) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"
- 40 ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. И-1-1-95. (с изменениями № 1)
- 41 СНиП 21–01–97. Пожарная безопасность зданий и сооружений. М.: Гострой России, 1997. – с.12.
- 42 Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. №69-ФЗ. О пожарной безопасности.

Приложение А
(обязательное)

Determining the delay time of triggering of commutator

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Бугаев Игорь Владиславович		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Юдин Артем Сергеевич	к.т.н.		

Консультант – лингвист Отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Квашнина Ольга Сергеевна			

A 4 Experimental part

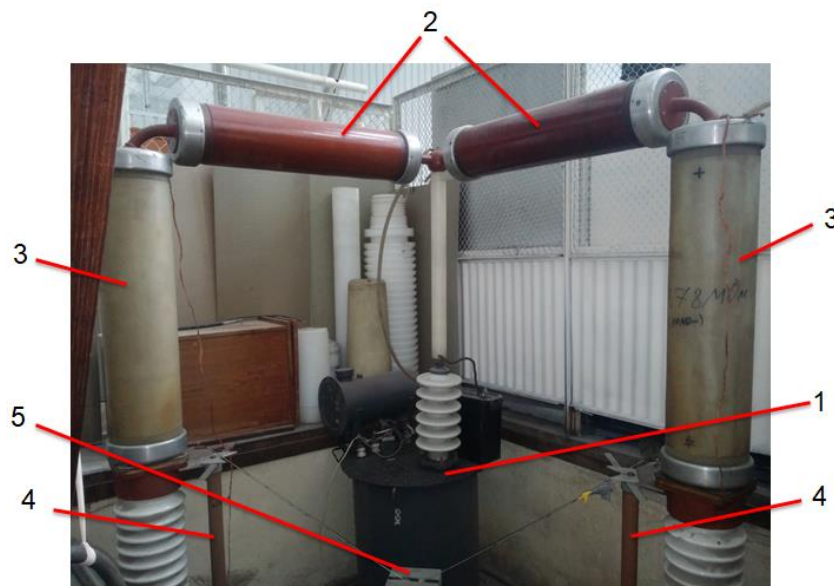
A 4.1 Determining the delay time of triggering of commutator

A 4.1.1 Purpose and procedure of the experiment

The purpose of the experiment is to determine the delay time of the manufactured switch that is intended for electric impulse drilling for a pulse voltage generator, comparison of the obtained data with the characteristics of other switches, and analysis of the experimental data.

Determination of the delay time of the arrester operation was obtained on a real generator of impulse voltages intended for electric impulse drilling (see Figure A1).

All dischargers are placed on the same line in a polypropylene tube in which there is a gas - nitrogen (N_2) at a pressure of 2-3 atm. A gas purge is performed across the discharge channel. The generator of impulse voltages was charged by a source on the basis of the high-voltage transformer IOM-100/25 (Figure A1).



1 - high-voltage transformer IOM-100/25;

2 - rectifiers; 3 - protective resistances;

4 - DPN, 5 - automatic earthing switch

Figure A1 - Source of rectified high voltage

Diodes (2) perform the function of voltage rectification. The source provides unipolar ("plus", "minus") and bipolar charging. Resistors (3) perform the protective function, they also limit the charging current. The protective shunting to earth is ensured by an automatic earthing switch (5). In our case, charging was carried out by positive voltage.

The charge voltage was measured by a kilovoltmeter C-100 (see Figure A2).



Figure A2 - Kilovoltmeter C – 100

The pulses were recorded by a system consisting of an electronic oscilloscope Tektronix TDS2014 (see Figure A3a) and voltage dividers:

- 1) To measure the voltage from the trigger generator, a high voltage pulse voltage divider DNV-25 (see Figure A3b) was used.

a)



b)



Figure A3 - Oscilloscope Tektronix TDS2014 (a) and voltage divider DNV-25 (b)

- 2) To register the pulse at the first interelectrode gap of the GIN, the divider KVC-120 was used (see Figure A4a).
- 3) To record the output pulse of the pulse voltage generator, the divisor DIN-2 was used (see Figure A4b)



Figure A4 - Voltage dividers DIN - 2 (a) and KVTs - 120 (b)

On the oscilloscope side, 75 ohm impedances and 1 k Ω filtering resistance are installed.

Some characteristics of the measuring system and their purpose in the experimental scheme are presented in Table A1.

Table A1 - Purpose of the elements of the measuring system

Device	Function
Tektronix TDS2014	Receiving signals from voltage dividers and obtaining waveforms
DNV-3000	Pulse recording from the trigger generator
KVTs – 120	Pulse recording at the first interelectrode gap of the GIN

Continuation of Table A1

DIN - 2	Recording the output pulse of the generator from the last capacitor
Electrostatic kilovoltmeter C - 100	Charging voltage measurement
Impedance 75 Ω	Coordination of the wave impedance of the transmitting cable RK-75
Filter resistance 1 k Ω	Reducing interference
3 coaxial cable PK - 75, the length of which is 15 m	Transmitting lines from voltage dividers to an oscilloscope

Technical characteristics of voltage dividers are presented in Table A2.

Table A2 - Technical specifications of KVTs 120:

Parameter	Value
Amplitude value of the maximum measured voltage, kV	180
Input impedance, M Ω	500 \pm 1%
Accuracy class, %	0.5
Length of output coaxial cable, m	3

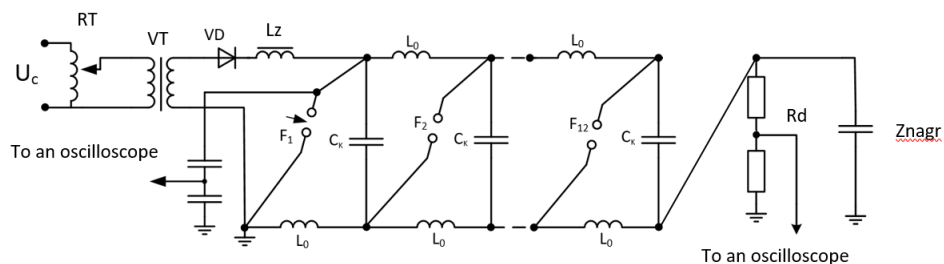
DIN 2 is an insulating polyethylene pipe with an outer diameter of 10⁶ mm, a height of 1600 mm, equipped with metal flanges on both sides. The high-voltage arm of DIN 2 with a resistance of 13,85 k Ω is made of nichrome wire of PEVNH-0,2 mm grade, low-voltage arm of 1,3 Ω resistance is made of three parallel-connected low-inductance resistors of TVO type - 0.25 W - 3.9 Ω . Also, in the divider, there is a matching resistance of 75 Ω .

Table A3 - Technical characteristics of DNV 25:

Parameter	Value
Operating voltage, kV	25.0
Input: active resistance, MΩ capacity, pF	100.0 ~ 3.0
Coefficient of division	$3 \cdot 10^3$
Bandwidth, MHz	0...35.0
Test voltage, kV: constant pulsed	30.0 40.0
Measurement error, %	3
Length of output coaxial cable, m	3.0

DIN 2 is an insulating polyethylene pipe with an outer diameter of 106 mm, a height of 1600 mm, equipped with metal flanges on both sides. The high-voltage arm of DIN 2 with a resistance of 13.85 kOhm is made of nichrome wire of PEVNH-0.2 mm grade, low-voltage arm of 1.3 Ohm resistance is made of three parallel-connected low-inductance resistors of TVO type - 0.25 W - 3.9 Ohm. Also, in the divider, there is a matching resistance of 75 Ohm.

The circuit for measuring the voltage at the first interelectrode gap and at the output of the GIN is shown in Figure A5.



U_c - mains voltage; RT - regulating transformer; VT - high-voltage transformer;
 VD - rectifying diode; L_z - shielding choke; L₀ - charge choke; Z_{nagr} - load
 resistance; F - spark gaps, R_d - resistance of the voltage divider;
 C_k - capacitors

Figure A5 - Scheme of recording pulses at the first and at the last interelectrode gap

Scheme of voltage measurement on the trigger generator in Figure A6

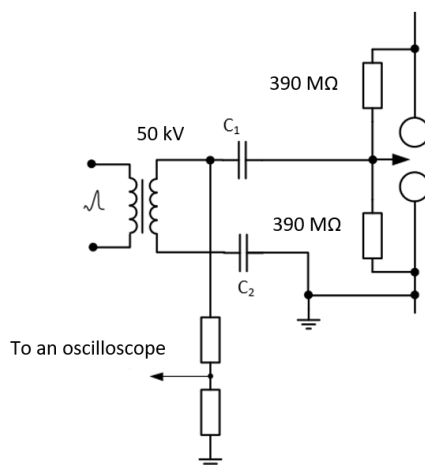


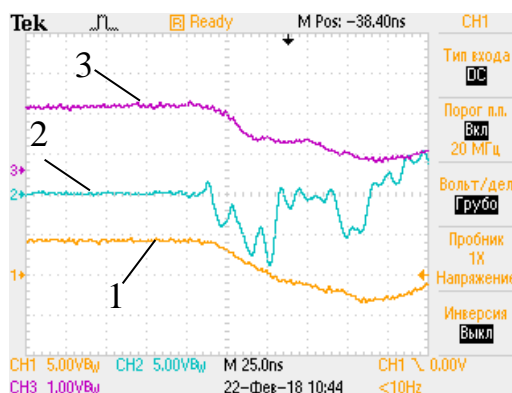
Figure A6 - Pulse register on the trigger generator

C_1 , C_2 – capacitors

4.2. Results of the experiment

4.2.1. Synchronization test

A synchronization test was conducted before the experiment. A signal from a single source - the trigger generator – was fed to all three voltage dividers. The oscillogram of the synchronization test is shown in Figure A7.



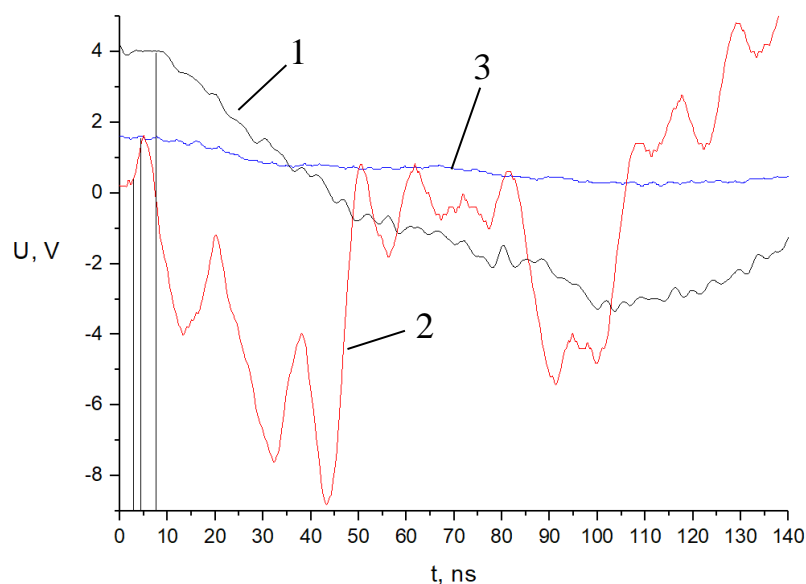
1 - voltage measured by the divider of the trigger generator;

2 - voltage measured by the divider of the first gap;

3 - voltage measured by the divider of the last gap

Figure A7 - Oscillogram of synchronization test

In the Origin program, the spread in the time of fixing the signals from the dividers was determined (see Figure A8). Since in this case the time characteristics are important, the voltage values on the oscillogram are indicated without taking into account the division factor of the divider and the filter resistance.



- 1 - voltage measured by the divider of the trigger generator;
- 2 - voltage measured by the divider of the first gap;
- 3 - voltage measured by the divider of the last gap

Figure A8 - Determination of the delay time

The data obtained are presented in Table A4.

Table A4 - Synchronization test results

t_1 , ns	t_2 , ns	t_3 , ns
4,6	2,8	7

In table t_1 - the moment of fixing the signal of the beginning of the discharge, fixed by the divider of the triggering oscillator, t_2 - by the divider of the first interelectrode gap, t_3 - by the divider of the latter. $\Delta t_{1,2,3}$ - difference in response time.

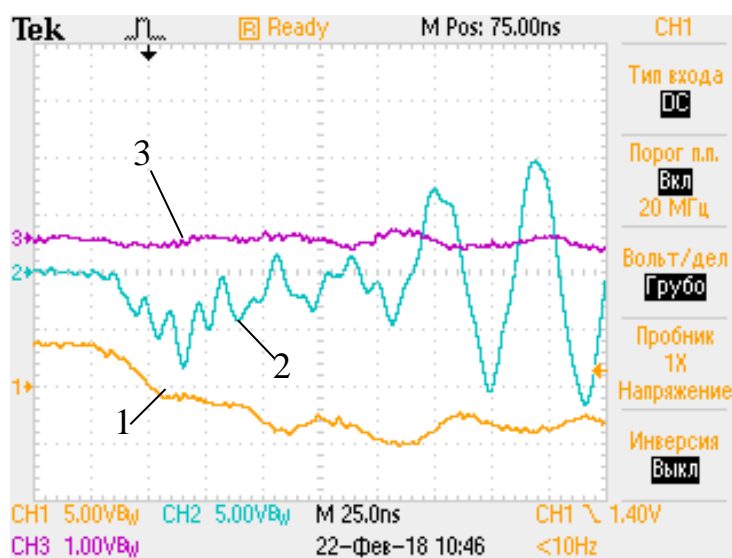
Intermediate conclusion: the spread in time between the moment of arrival of the ignition pulse and the moment of operation of the main discharge gap on the first

spark gap is $\Delta t_{1,2} = 1.8$ ns. The spread between the divider of the triggering generator and the last gap $\Delta t_{1,3} = 4.2$ ns. The spread between the divider of the first and last inter - $\Delta t_{2,3} = 2.4$ ns.

4.2.2 Determination of the delay time for the operation of the first interval after the starting pulse

A voltage of 25 kV was applied to the main interelectrode gap. The initiation was carried out by feeding a 50 kv trigger pulse to the ignition electrode.

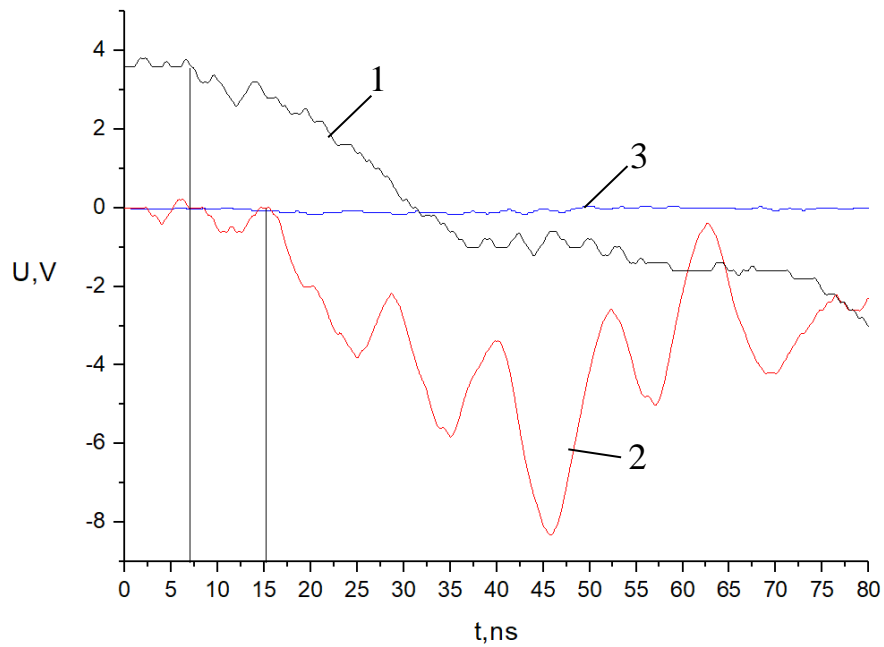
As a result of the experiment, an oscillogram was obtained (see Figure A9).



- 1 - voltage measured by the divider of the trigger generator;
- 2 - voltage measured by the divider of the first gap;
- 3 - voltage measured by the divider of the last gap

Figure A9 - Oscillogram

In the Origin program, the delay time of the main discharger after the ignition pulse was determined (see Figure A10).



- 1 - voltage measured by the divider of the trigger generator;
- 2 - voltage measured by the divider of the first gap
- 3 - voltage measured by the divider of the last gap

Figure A10 - Determination of delay time

Table A5 - Delay time measurement results

No. of experiment	t_1 , ns	t_2 , ns
1	7,5	15,8
2	4,6	13,4
3	8,5	14
4	7,5	15

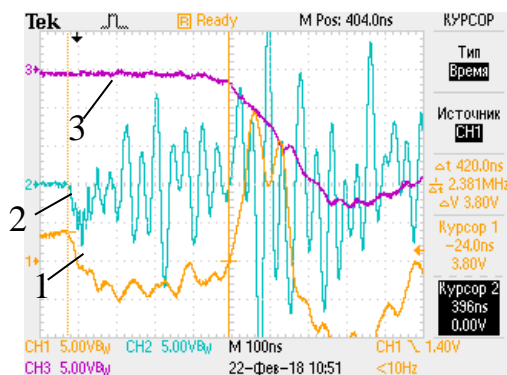
According to Table A5, the average time of the triggering of the starting pulse is 7.03 ns, the first interval is 14.55 ns.

Intermediate terminal: the average delay time between the moment of arrival of the ignition pulse and the moment of operation of the main discharge gap of the first spark gap is 7.52 ns.

4.2.3 Determination of the delay time for the operation of the first gap, the last gap and the starting pulse

In this experiment, the charging voltage was 25 kV, the initiation was carried out by an ignition pulse of 50 kV.

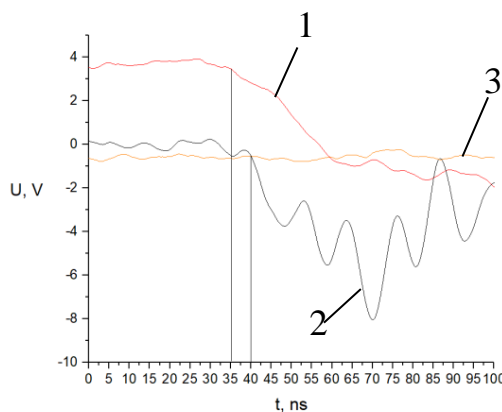
The oscillogram of the first experiment is shown in Figure A11.



- 1 - voltage measured by the divider of the trigger generator;
- 2 - voltage measured by the divider of the first gap;
- 3 - voltage measured by the divider of the last gap

Figure A11 - Oscillogram

In the Origin program, the moments of arrival of the starting pulse and the triggering of the main gap of the first arrester were determined (see Figure A12).

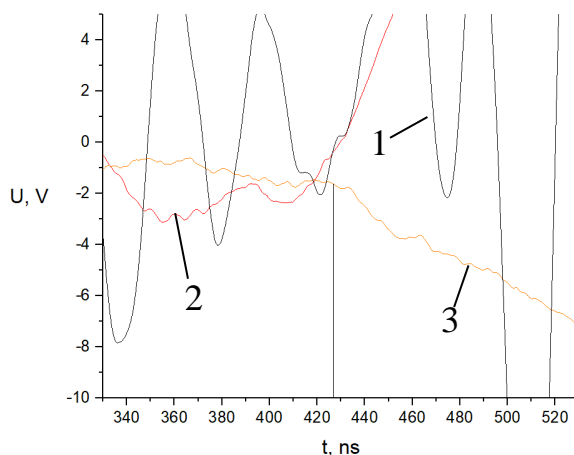


- 1 - voltage measured by the divider of the trigger generator;
- 2 - voltage measured by the divider of the first gap
- 3 - voltage measured by the divider of the last gap

Figure A12 - Oscillogram

The obtained data are presented in Table A6.

The response time of the last gap is determined from Figure (see Figure A13)



1 - voltage measured by the divider of the trigger generator;

2 - voltage measured by the divider of the first gap

3 - voltage measured by the divider of the last gap

Figure A13 - Oscillogram

In total, 5 experiments were conducted to measure the delay time. The results are shown in Table A6.

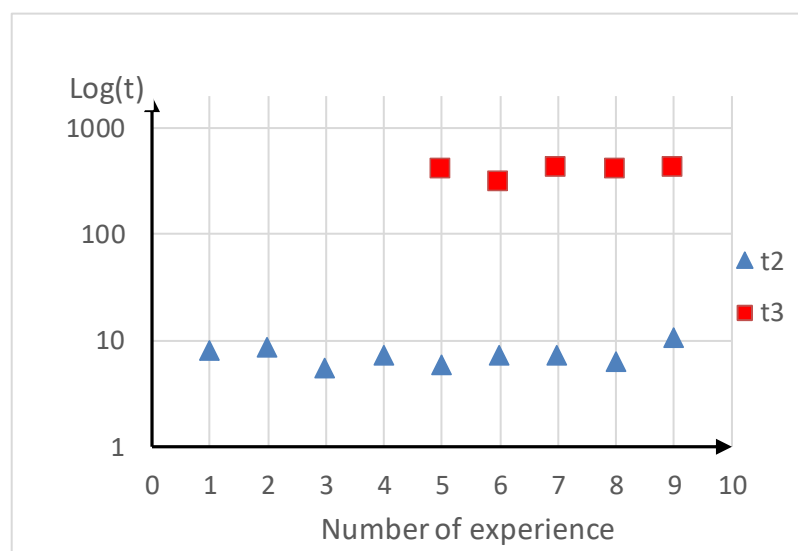
Table A6 - Measurement results

	t_1 , ns	t_2 , ns	t_3 , ns
5	9	15	427
6	12,5	20	330
7	5	12,5	430
8	7,6	14	420,4
9	3,6	14,4	432
t_{cp}	7,54	15,8	407,88

Table A7 - Summary of all experiments

№	t_1 , ns	t_2 , ns	
1	7,5	15,8	-
2	4,6	13,4	-
3	8,5	14	-
4	7,5	15	-
5	9	15	427
6	12,5	20	330
7	5	12,5	430
8	7,6	14	420,4
9	3,6	14,4	432
t_{cp}	7,31	14,9	407,88

According to Table A7, we plot the moments for the arrival of the ignition pulse and the main discharge gap in the logarithmic scale (see Figure A14).



t_2 - moment of arrival of the ignition pulse;

t_3 - the moment of operation of the last arrester

Figure A14 - Moments of pulse recording depending on the number of the experiment

In Figure A14, the moment of arrival of the igniting pulse is taken as the origin.

Figure A15 shows the delay time for the operation of the main spark gap of the first arrester. The moment of arrival of the igniting pulse is taken as the origin of the count.

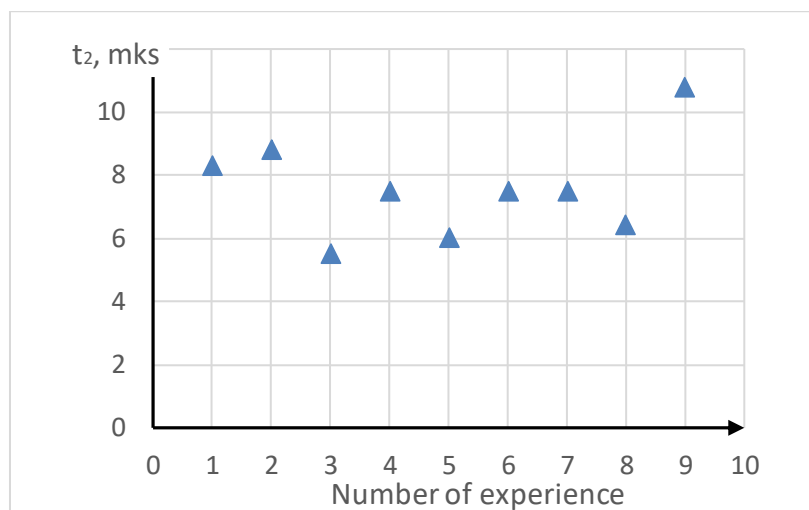


Figure A15 - Delay time of the arrester triggering depending on the number of the experiment

The average delay time of the first arrester was $t_{1-2} = 7.58$ ns

Intermediate output: the spread in time between the moment of arrival of the ignition pulse and the moment of operation of the main discharge gap of the first spark gap is $\Delta t_{1,2} = 7.64$ ns. The spread in time between the moment of arrival of the ignition pulse and the moment of operation of the discharge gap of the last arrester $\Delta t_{1,3} = 400,34$ ns. The spread in time between the triggering of the discharge gaps of the first and last arresters is $\Delta t_{2,3} = 392.7$ ns.

Discussion of the results: the spread in time between the moment of arrival of the ignition pulse and the moment of operation of the main discharge gap of the first spark gap, taking into account the results of the synchronization test, is $\tau_{1-2} = 7.58 \pm 2.4$ ns. The spread in time between the moment of arrival of the ignition pulse and the moment of operation of the discharge gap of the last spark gap $\tau_{3-3} = 400.56 \pm 7$

ns. The spread in time between the moments of operation of the main discharge gaps of the first and last arresters is $\tau_{2-3} = 392.98 \pm 4,6$ ns.

The obtained data on the delay time between the moment of arrival of the ignition pulse and the moment of operation of the main discharge gap of the first spark gap ($\tau_{1-2} = 7.58 \pm 2.4$ ns) are similar to the delay time of the cascade arrester with the initiation by the principle of «field distortion" ($\tau_3 = 5$) - Table 1. And it exceeds the delay time of trigatron with the same principle of initiation ($\tau_d = 20$ ns) - Table B1.

Приложение Б (обязательное)

Характеристики разрядников

Таблица Б.1 - Характеристики тиратронов. АО «НПП «Контакт» [12]

Тип	Подогреватель генератора водорода, макс		Подогреватель генератора водорода, макс		Предельное значение параметров				
	Напряжение накала катода, В	Ток накала катода, А	Напряжение накала генератора водорода, В	Ток накала генератора водорода, А	Амплитуда прямого напряжения анода, кВ	Амплитуда импульса тока анода, А	Средний ток анода, А	Длительность импульса тока анода, мкс	Частота повторения импульсов
ТГИ1 – 1000/25	6,6	22	6,6	1,6	25	1000	1	50	5000
ТГИ1 – 2500/50	6,6	94	6,6	2,8	50	2500	4	30	400
ТГИ1-5000/50	6,6	202	6,6	2,9	52	5200	10	16	120
ТГИ1-5000/50 А	6,3	202	6,6	2,9	16	400	25	32	3750

Таблица Б. 2 – Параметры тиратронов, разработанных в ИСЭ СО РАН [13]

Тип	Анодное напряжение, кВ	Максимальный анодный ток, кА	Средний ток, А	Габариты (диам. Н, мм)	Ресурс, ΣQ , Кл	Максимальная частота, кГц
ТДИ1-50к/16	5 - 16	50	0,15	50x52	10^5	0,1
ТДИ1-50к/25	5-25	50	0,25	98x80	2×10^5	0,1
ТДИ1-50к/50	5-50	50	0,25	98x88	2×10^5	0,1
ТДИ1-150к/25	5-25	150	0,5	118x50	5×10^5	0,1
ТПИ1-10к/50	1-50	10	0,3	25x22	10^6	2,0

Таблица Б.3 – Технические параметры РВУ [14]

	РВУ-7	РВУ-31Н	РВУ-31	РВУ-101
Рабочее напряжение, кВ	0,05-18	0,5-35	0,5-50	3-100
Рабочий ток, кА	0,2-80	0,2-60	0,2-60	1-60
Максимальное количество электричества в импульсе, Кл	1	5	5	5
Ресурс (число включений)	$5 \cdot 10^4$	10^5	10^5	$5 \cdot 10^4$
Напряжение поджига, кВ	6	6	6	8
Ток поджига, не менее, А	50	100	100	100
Длительность тока поджига, мкс	0,1-2	0,2-10	0,2-10	0,2-10
Диаметр, мм	50	78	100	100
Высота, мм	100	220	195	346
Вес, кг	0,6	2,2	3,5	7

Таблица Б.4 - Основные технические характеристики высоковольтных газовых управляемых разрядников [15].

№	Тип разрядника	U _{раб} , (кВ)	I _{тах} , (кА)	Максимальный заряд, переносимый за импульс при T _{≤100} мкс, (Кл)	T _{имп} , (мкс)	Ресурс с при T _{≤100} мкс, (кл)	Предельная частота срабатывания, (Гц)	Габаритные размеры, (мм)	Масса (кг)
1	РГУ-1-10-100	2-10	100	5	≤100	2x10 ⁵	≤3	Ø145x60	3
2	РГУ-1-50-100	10-50	100	5	≤100	2x10 ⁵	≤3	Ø145x100	5
3	РГУ-1-75-100	15-75	100	5	≤100	2x10 ⁵	≤3	Ø145x180	6
4	РГУ-2-50-50	10-50	50	2,5	≤100	2x10 ⁵	≤3	Ø90x100	1,5

Таблица Б.5 – Характеристики газовых разрядников [16]

Тип разрядника	$U_{0\max} - U_{0\min}$	I_{\max} , кА	Q, кЛ/имп	Ресурс, N	τ_z , нс	σ , нс	L_p , нГн
Разрядники нормального и повышенного давления:							
Тригатрон с искажением поля (воздух)	150 - 140	200	5	10^4	200	20	100
Разрядник каскадный с автоматической подсветкой	60 -(40)	30	7	-	50	(5)	40
Разрядник каскадный (воздух)	50 - (20)	100	10	-	-	10-50	30
Разрядник каскадный с искажением поля (0,1 – 0,6 МПа)	100-(70)	75	5	10^3	30	5	35-50
Разрядники пониженного давления (вакуумные)							
секционированный	30-(1)	2000	20	10^3	200	20	5
несекционированный	30 – 1	2000	4	$>10^3$	(200)	(20)	(5)
несекционированный	50 – 1	1500	70	10^4	200	20	7
целевой	50 – 1	500	10	10^3	100	15	5
С секционированным корпусом	100 – 1	1500	70	10^4	200	20	10
Вакуумный разрядник	30 - 5	2000	10	10^3	(300)	-	15

CD-диск. "Разработка искровых коммутаторов с циркуляцией газа для ГИН
Аркадьева-Маркса "