

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики
Отделение Электроэнергетика и электротехника
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Профиль Оптимизация развивающихся систем электроснабжения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Электроэрозионная стойкость контактных элементов при коммутации сильноточной электрической дуги

УДК 621.316.56.014.31

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM93	Борисова Марьяна Султановна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Герасимов Дмитрий Юрьевич	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и
ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Якимова Татьяна Борисовна	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рахматуллин Ильяс Аминович	К.Т.Н.		

Томск 2021 г

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики
Отделение Электроэнергетика и электротехника
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) _____
(Дата) Рахматуллин И.А.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5AM93	Борисова Марьяна Султановна

Тема работы:

**Электроэрозионная стойкость контактных элементов при коммутации
сильноточной электрической дуги**

Утверждена приказом (дата, номер)

07.12.2020, №342-69/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом исследования являются материалы контактных элементов.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1. Провести обзор имеющейся литературы по материалам электрических контактов, износе контактов и его причинам;2. Описать экспериментальную установку;3. Провести лабораторные исследования;4. Определение износостойкости контактов по удельной эрозии.

Перечень графического материала	презентационный материал
--	--------------------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Якимова Татьяна Борисовна
Социальная ответственность	Скачкова Лариса Александровна
Раздел, выполняемый на английском языке	Качалов Николай Александрович

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ	Герасимов Дмитрий Юрьевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM93	Борисова Марьяна Султановна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ93	Борисова Марьяна Султановна

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭЭ
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>	Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами. Оклады в соответствии с окладами сотрудников «НИ ТПУ»
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- районный коэффициент – 1,3; - накладные расходы – 16%.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Общая система налогообложения. Отчисления во внебюджетные фонды – 30,2%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ потенциальных потребителей, анализ конкурентных технических решений, проведение SWOT-анализа
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика проекта: - Определение структур работ; - Определение трудоемкости работ; - Разработка диаграммы Ганта. Формирование бюджета затрат проекта.
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Расчет показателей сравнительной эффективности проекта, интегрального показателя ресурсоэффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Карта сегментирования рынка
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.2021
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	К.Э.Н.		01.02.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ93	Борисова Марьяна Султановна		01.02.2021

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM93	Борисова Марьяна Султановна

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Электроэрозионная стойкость контактных элементов при коммутации силовоточной электрической дуги	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования являются материалы контактов автоматических выключателей. Результаты исследования могут применяться в области электротехнического материаловедения и проектировании коммутационных аппаратов до 1000 В.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <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. 	<ul style="list-style-type: none"> – «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.04.2021); – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; – СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение; – ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения); – СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы; – СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.; – ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля; – ГОСТ 12.1.019–79. Электробезопасность. Общие требования.
2. Производственная безопасность: <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – электромагнитное излучение; – превышение уровня шума; – недостаточная освещенность рабочего места; – отклонение показателей микроклимата. <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – поражение электрическим током;

	<ul style="list-style-type: none"> – вдох паров металла; – поражение персонала незащищенным подвижными элементами оборудования.
3. Экологическая безопасность:	– Влияние электромагнитного излучения, паров металла на экологическую безопасность.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Наиболее вероятные ЧС: возгорание элементов лабораторной установки, проводников.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	28.01.2021
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM93	Борисова Марьяна Султановна		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетика и электротехника

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования магистратура

Период выполнения весенний семестр 2020/2021 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела/ вид работы	Максимальный балл раздела, %
	1. Литературный обзор	15
	2. Описание экспериментальной установки	25
	3. Проведение исследования	30
	4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
	5. Социальная ответственность	10
	6. Раздел, выполняемый на иностранном языке	10
	Выполненная магистерская диссертация	100

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ	Герасимов Дмитрий Юрьевич	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рахматуллин Ильяс Аминович	К.Т.Н.		

Результаты обучения

профессиональные и общекультурные компетенции по основной образовательной программе подготовки магистров 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Код результата	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Универсальные компетенции</i>		
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 3; ОПК-1, 2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i>
P2	<i>Свободно пользоваться</i> русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.	Требования ФГОС (ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i>
P3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-2, 3; ОПК-1; ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i>
P4	Использовать представление о методологических основах <i>научного познания и творчества</i> , роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением <i>современных информационных технологий</i> , синтезировать и критически резюмировать информацию.	Требования ФГОС (ОК-3; ОПК-1, 4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i>
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P5	Применять <i>углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности, связанной с автоматизированными системами диспетчерского управления в электроэнергетике.	Требования ФГОС (ОПК-4; ПК- 4-6), Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i>
P6	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа при проектировании, эксплуатации и обслуживании автоматизированных систем диспетчерского управления электроэнергетических систем с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.	Требования ФГОС (ПК-1, 7,8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i>
P7	Выполнять инновационные <i>инженерные проекты</i> по разработке аппаратных и программных средств автоматизированных систем диспетчерского управления электроэнергетических систем с использованием современных методов проектирования и передового опыта разработки конкурентоспособных систем	Требования ФГОС (ПК-2, 9, 10, 11). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i>
P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области автоматизированных систем управления электроэнергетических систем, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.	Требования ФГОС (ПК-3, 13, 14, 15, 24-26). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI.</i>

Код результата	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
P9	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; осуществлять профессиональную деятельность руководствуясь требованиями стандартов и рынка; разрабатывать планы и программы организации профессиональной деятельности на предприятии; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 16-20, 24, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i>
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные</i> работы оборудования и программного обеспечения по профилю профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-22, 23, 25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i>
P11	<i>Осваивать новое оборудование и программное обеспечение в сфере автоматизации диспетчерского управления</i> ; проверять техническое состояние и остаточный ресурс эксплуатируемых программно-технических комплексов и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.	Требования ФГОС (ПК-27, 28), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i> .
P12	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.	Требования ФГОС (ПК-29, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI, работодателей</i>

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 79 страниц, 15 рисунков, 22 таблицы, 33 источника, 1 приложение.

Ключевые слова: электроэрозионная стойкость, электрические контакты, экспериментальная установка, электрический износ, дуговой разряд, плазма, генератор импульсных токов, электротехнические материалы.

Объектом исследования являются электрические контакты, выполненные из меди, железа, вольфрама и сплава медь-вольфрам.

Цель работы - исследование электроэрозионной стойкости контактных элементов при коммутации силовоточной электрической дуги.

В процессе исследования были установлены причины износа контактов, произведен обзор основных материалов электрических контактов. Приведено описание экспериментальной установки, на которой был проведен ряд опытов с электрическими контактами.

В результате исследования были получены энергетические характеристики дуги, на основании которых расчетным путем получены данные об электрической эрозии исследуемых материалов контактов.

Список принятых сокращений

КЗ – короткое замыкание;

ГИТ – генератор импульсных токов;

ТН – трансформатор напряжения;

НТИ – научно-техническое исследование;

ПУЭ - правила устройства электроустановок;

СИЗ – средства индивидуальной защиты;

ЧС – чрезвычайная ситуация

Оглавление

Введение.....	14
1 Литературный обзор	15
1.1 Материалы электрических контактов	15
1.2 Электрическая эрозия при коммутации.....	17
1.3 Износ контактов, методы уменьшения износа.....	20
2 Установка для исследования электроэрозионного износа электродов	23
2.1 Блок управления и регистрации	24
2.2 Параметры генератора импульсных токов	25
2.3 Макетное устройство	27
3 Методика эксперимента	29
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	34
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	34
4.2 Анализ конкурентных технических решений	35
4.3 SWOT-анализ.....	36
4.4 Инициация проекта	37
4.5 Планирование научно-исследовательским проектом	38
4.6 Бюджет научного исследования	41
4.6.1 Основные материальные затраты исследования	41
4.6.2 Основная заработная плата	42
4.7 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	44
5 Социальная ответственность	47
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	47
5.2 Производственная безопасность.....	49

5.3 Экологическая безопасность.....	57
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	58
Заключение	61
Список используемой литературы	63
Приложение А	66

Введение

Автоматические выключатели позволяют осуществлять не только коммутационные операции, а также являются аппаратами защиты элементов электрической цепи от сверхтоков. Износ контактных элементов электрических аппаратов приводит к увеличению потерь электроэнергии, нагреву и возникновению аварий. Данные о причинах возгораний на объектах промышленных предприятий и жилых помещений, представленные национальной ассоциации спасательных и экологических организаций, указывают на то, что порядка 50% пожаров электрических установок вызваны в результате отказа электрических контактов. По этой причине существует необходимость повышения их надежности и увеличения износостойкости контактных элементов. Одним из способов достижения поставленных задач является изготовление контактов из материалов наиболее стойких к электрической эрозии.

Целью данной работы является исследование электроэрозионной стойкости контактных элементов при коммутации силовых электрических дуг. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. выбора параметров экспериментальной установки, определение ее преимуществ и недостатков;
2. определения наиболее износостойкого материала из исследуемых образцов;
3. определение затрат на проведение научного исследования;
4. определены вредные и опасные факторы, которым подвергается персонал в ходе исследования, а также пути их минимизации.

Результаты исследования в дальнейшем могут применяться при проектировании коммутационных аппаратов.

1 Литературный обзор

1.1 Материалы электрических контактов

Электрический контакт представляет собой соприкосновение поверхностей двух одинаковых или разнородных проводников [1,2]. По условиям работы они делятся на три типа: разрывные, скользящие, неподвижные. Тип контакта определяется его назначением, значениями тока и контактного нажатия, конструкцией контактного узла и всего аппарата [6].

К материалам, из которых изготовлены электрические контакты, предъявляются требования, зависящие от происходящих физических процессов. Надежность и срок службы контакта определяется материалом, из которого изготовлен контакт. Требования к материалам контактов предъявляются исходя из их режима работы. К одним из главных требований относят: материал контактов должен иметь высокую тепловую и электрическую проводимость, что приводит к уменьшению количества теплоты, выделяемое после замыкания контакта, и улучшению теплоотвода. Также это приводит к уменьшению образования процессов окисления на поверхности контактов [5].

Для изготовления слаботочных контактов применяются благородные металлы золото, платина, серебро, палладий, а также их сплавы такие как: AuNi, AuPd-Ni, AuAg, AuAg-Ni, AuPd-Ni, PtIr и др. Из-за своей дороговизны такие металлы применяются только в виде тонких покрытий, наносящихся на железо, медь, алюминий. Нанесение таких покрытий улучшает электрические и механические свойства контактов. Минимальная эрозия достигается в сплавах золота и серебра в 50% соотношении.

Материалами средне загруженных контактов служат медь, железо, вольфрам, алюминий, латунь и их сплавы. Сплавы медь-серебро имеют более высокую электроэрозионную стойкость, чем контакты из меди [4]. Наибольшую дугостойкость имеют контакты, выполненные из сплавов медь-вольфрам, медь-молибден, они меньше подвержены износу и свариванию благодаря высокой

температуре плавления. Сплавы медь-кадмий обладает более высокой твердостью и равномерным износом.

Самые тяжелые условия работы имеют контакты, рассчитанные на большие значения токов и напряжений, и по этой причине имеют наибольшие контактные нагрузки. Сильноточные контакты выполняются из тугоплавких материалов, таких как вольфрам, молибден их сплавы и псевдосплавы, также широкое распространение в этой области получили контакты из металлокерамики. Металлокерамические контакты изготавливаются путем прессования и спекания порошков металлов. Такая технология позволяет объединять свойства металлов с разными характеристиками. Широко используются контактные элементы из вольфрамовых или молибденовых порошков, пропитанных жидким серебром или медью. В таких композициях тугоплавкая фаза увеличивает стойкость к электрической эрозии, износу и свариванию, а легкоплавкие компоненты обеспечивают высокую тепло- и электропроводность, стойкость к окислению. Благодаря своим характеристиками контакты из металлокерамики используются в выключателях большой мощности, пускателях, реле, регуляторах напряжения [1]. На рисунке 1 приведены области применения основных металлов для электрических контактов в зависимости от величины тока [7].

Одним из перспективных направлений в области проектирования сильноточных коммутационных аппаратов является применение жидкометаллических контактов [6]. Среди жидких металлов наибольшее распространение получил галлий и его сплавы такие как GaIn-Sn. К достоинствам таких контактов относятся малое переходное сопротивление, высокая допустимая плотность тока, высокая механическая и электрическая износостойкость. К недостаткам относятся химическая активность галлия, необходимость подогрева контактов до момента включения, требования к стабильности положения контактов.

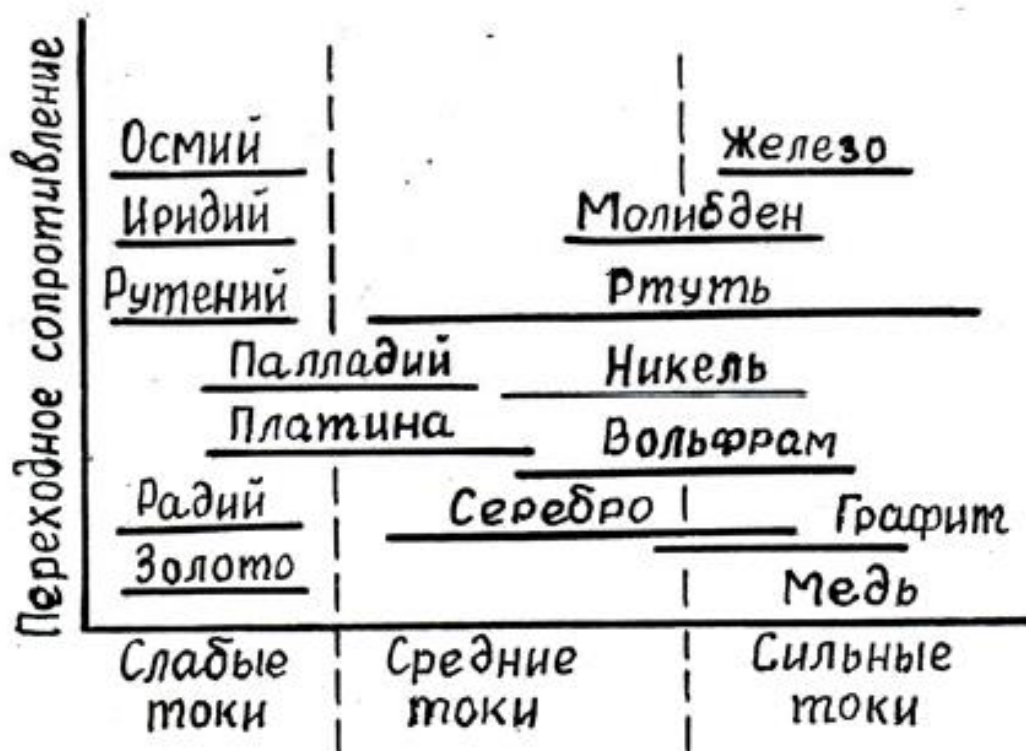


Рисунок 1 - Область применения материалов электрических контактов

1.2 Электрическая эрозия при коммутации

Самый тяжелый режим работы контактов имеет место при размыкании контактов, когда возникает дуга, которая вследствие высокой плотности тока и температуры приводит к разрушению контактов.

Между контактами коммутационных аппаратов постоянно возникает электрическая дуга, вызывающая более или менее интенсивную эрозию контактов, что сказывается на быстрейшем действии, надежности и долговечности аппарата. Разрушение электрода в разряде может быть обусловлено «прямым» воздействием разряда на поверхность металла, электрически связанного с разрядным каналом, или же побочными процессами «неэлектрической» природы, например, ударными волнами, наиболее интенсивно возбуждаемыми в мощных импульсных разрядах, световым излучением из зоны разряда, термомеханическими и термохимическими процессами и т. д. Эрозионный процесс, обусловленный воздействием на электроды высокотемпературного «облака» из паров и газов (плазмы), обычно называют «плазменной» эрозией.

При достаточно большой величине межэлектродного промежутка процессы разрушения (эрозии) электродов связаны в основном с двумя механизмами: бомбардировкой анода быстрыми электронами и катода – положительными ионами. При малых межэлектродных промежутках существенный вклад вносят и другие механизмы передачи энергии из разрядного канала электродам. Эти процессы не обязательно вызывают «разрушение» электрода в смысле механического укуса материала; на поверхности электрода могут возникать структурные изменения, фазовые превращения, химические реакции и другие процессы, что в конечном счете может привести к необратимым изменениям физических свойств электродов. Например, небольшое нарушение тонкой поверхностной пленки на «оксидном» катоде может вызвать существенное изменение его эмиссионных свойств и изменение режима работы соответствующего газоразрядного прибора или устройства.

Электроэрозионные явления можно разделить на два больших класса – контактно-эрозионные («металл-металл») и бесконтактно-эрозионные («металл-плазма-металл») явления. К первому классу относятся те формы эрозии, которые наблюдаются в местах контактирования друг с другом электродов контактов при прохождении между ними тока. Ко второму классу относятся все формы эрозии, наблюдаемые в электрических разрядах – «газоразрядная эрозия» (в частности, «плазменная» эрозия). К числу явлений первого класса принадлежат, прежде всего, контактная эрозия замыкания и размыкания и «электровзрывная» эрозия.

При замыкании электродов (контактов коммутационного аппарата или электрической коллекторной машины) на их поверхностях в местах начального соприкосновения плотность тока может достигать очень высоких значений, поскольку из-за неизбежных «микронеровностей» поверхности площадь поперечного сечения трубок тока при замыкании контактов очень мала. Поэтому в этих местах может возникнуть сильный локальный разогрев металла вплоть до температуры плавления и «взрывного» испарения материала. Интенсивность контактной эрозии замыкания зависит от условий замыкания и физических свойств материалов контактов. Если напряжение на контактах перед их

замыканием прерывает напряжение пробоя газового промежутка, то возникает разряд, и к «собственно контактной» эрозии добавляется еще и газоразрядная эрозия. При размыкании (разведении) электродов в местах «остаточного» контакта выделяется большое количество тепла, что приводит к плавлению материала. При дальнейшем разведении контактов расплавленная масса вытягивается в виде жидкого «мостика». В зависимости от свойств материала и параметров контактной системы эти мостики могут разрушаться «взрывообразно» или путем «спокойного» испарения в местах сужения. Возможен также разрыв мостика без удаления материала, что приводит к его преимущественному переносу от одного электрода к другому; такой «мостиковый перенос» часто имеет место на контактах слаботочной низковольтной аппаратуры. К этой «контактной» эрозии размыкания может добавляться газоразрядная эрозия, как и при замыкании, если параметры электрической цепи допускают возникновение разряда между расходящимися контактами. Процессы разрушения плавких предохранителей и вообще проводников в местах сужения при протекании в них сильных электрических токов называют «электровзрывной» эрозией. Протекание этих процессов в основном зависит от скорости подвода электрической энергии к зоне «взрыва». После завершения этой «взрывной» эрозии между образовавшимися электродами (остатками плавкой вставки в случае предохранителей) может возникать разряд, и дальнейшее их разрушение носит характер газоразрядной эрозии. Таким образом, контактная эрозия во многих случаях неразрывно связана с бесконтактной (газоразрядной) эрозией.

Электроэрозионный процесс рассматривался также как прямое следствие индивидуальной бомбардировки поверхности электродов – катода положительными ионами и анода – электронами. Вследствие бомбардировки на локализованных участках электродов возникает сильный «точечный» нагрев поверхности до температуры испарения материала. Такие представления особенно часто использовались при рассмотрении явления катодного распыления в тлеющем разряде. Однако трудно представить себе, чтобы вся

масса металла, уместяющегося в эрозионной лунке и достигающего при мощном единичном разрядном импульсе объема нескольких миллиметров, испарялась дискретными порциями, определяемыми ударами одиночных заряженных частиц. Действительно, расчеты показывают, что энергоемкость такого процесса должна быть значительно больше фактически наблюдаемой. Кроме того, экспериментальные данные свидетельствуют о значительной доле жидкого металла в продуктах эрозии при импульсном разряде. В то же время испарение металла также вносит определенный (зачастую и преобладающий) вклад в газоразрядную эрозию.

1.3 Износ контактов, методы уменьшения износа

В результате анализа работы сильноточных разрывных контактов в конструкциях коммутационных устройств, можно прийти к выводу, что для решения проблемы электроэрозионного износа, только применения новых контактных материалов недостаточно. Следует одновременно продолжать поиски методов снижения энерговыделения на контактных поверхностях при размыкании [5].

Под износом контактов понимают разрушение рабочей поверхности коммутирующих контактов, приводящее к изменению их формы, размера, массы и к уменьшению провала.

Электрический износ связан с возникновением электрических разрядов (дуги), искрением, оплавлением, испарением и переносом металла с одного контакта на другой. Совокупность этих явлений называется эрозией. Электроэрозионное изнашивание выражается в изменении формы контактов, образовании кратера (впадины) на одном контакте и иглы (выступа) на другом, что может привести к свариванию и спеканию контактов. На рисунке 2 приведена относительная дугостойкость материалов электрических контактов, построенной по результатам с короткой дугой 0,8 мм при токе 12 кА и времени протекания тока 0,0085 с [6].

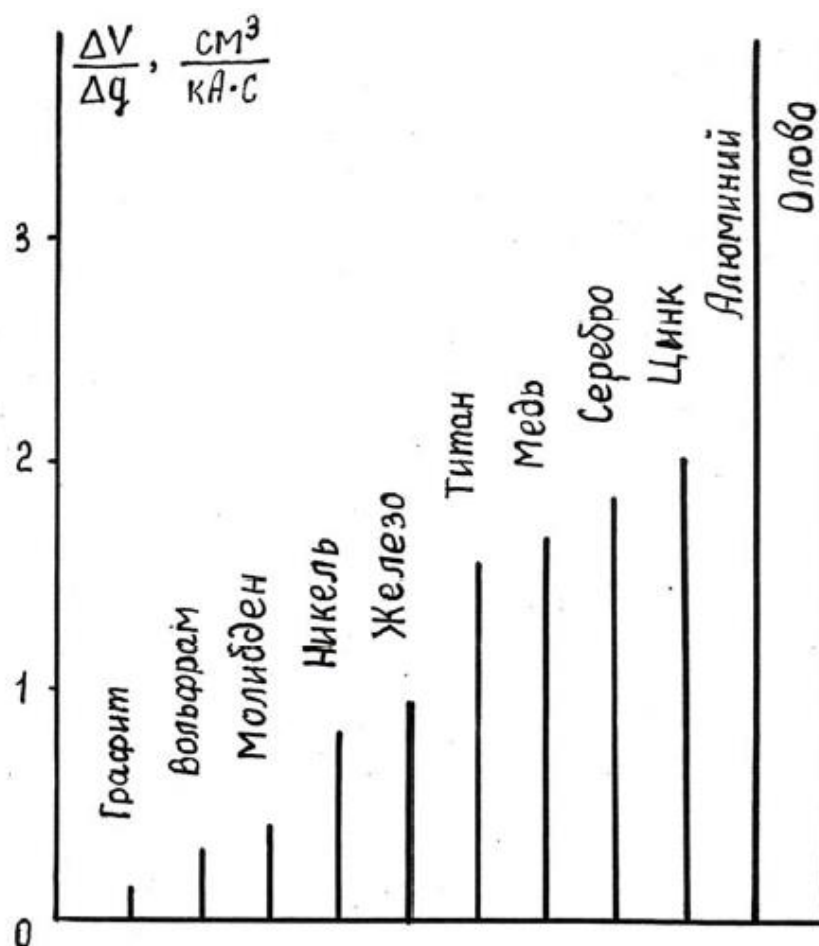


Рисунок 2 - Зависимость объема эрозии от количества электричества

Спекание - соединение контактов металлическим мостиком при пробое оксидной пленки из-за недостаточных контактных давлений для ее разрушения.

Химический износ – это коррозионный износ в результате химического взаимодействия с окружающей средой. Коррозия сопровождается образованием непроводящих пленок на контактных поверхностях, что может вызвать частичное или полное нарушение проводимости контактов.

Механический износ контактов от механических воздействий проявляется в их истирании, деформации и растрескивании [1].

В аппаратах, рассчитанных на большое число включений и отключений (выключатели, контакторы, контроллеры), применяют конструкции контактов с перекатывающимися поверхностями. Такие контакты замыкаются и размыкаются, соприкасаясь одним участком поверхности, где происходит горение электрической дуги и наблюдается повышенный механический износ, а затем в процессе работы передвигаются друг относительно друга, и в

дальнейшем электрический контакт поддерживается между чистыми поверхностями. Перекатывающиеся контакты износостойки, поскольку при их работе трение скольжения невелико. При перекатывании контактных элементов происходит их самозачистка от окисных пленок.

Другим методом защиты контактной поверхности от обгорания является использование дополнительных дугогасительных контактов, которые включены параллельно главным контактам. Главные контакты рассчитывают на длительное протекание рабочего тока, а дугогасительные — на меньший ток, но их контактные поверхности выполняют из тугоплавкого материала. При включении сначала замыкаются дугогасительные контакты, и электрическая дуга, возникающая при отскоках этих контактов, может вызывать некоторый их подгар. Затем включаются главные контакты, шунтируя дугогасительные.

При отключении сначала размыкаются главные контакты, но цепь остается замкнутой через дугогасительные контакты, и только после полного отключения главных контактов начинают размыкаться дугогасительные, разрывая электрическую цепь. Таким образом, при включении и при отключении аппарата электрическая цепь создается и разрывается дугогасительными контактами, на которых возникает электрическая дуга и образуются подгар и окисные пленки. Во всех случаях электрической дуги между главными контактами не возникает, и они соприкасаются чистыми поверхностями.

2 Установка для исследования электроэрозионного износа электродов

Для физического моделирования тока короткого замыкания через дугу использовалось устройство, приведенное на рис. 3. Конструкцию установки условно можно разделить на три основных блока: блок генерации импульсного тока (рис. 3а), блока электродов (рис. 3б) и блока контроля и измерения (рис. 3в).

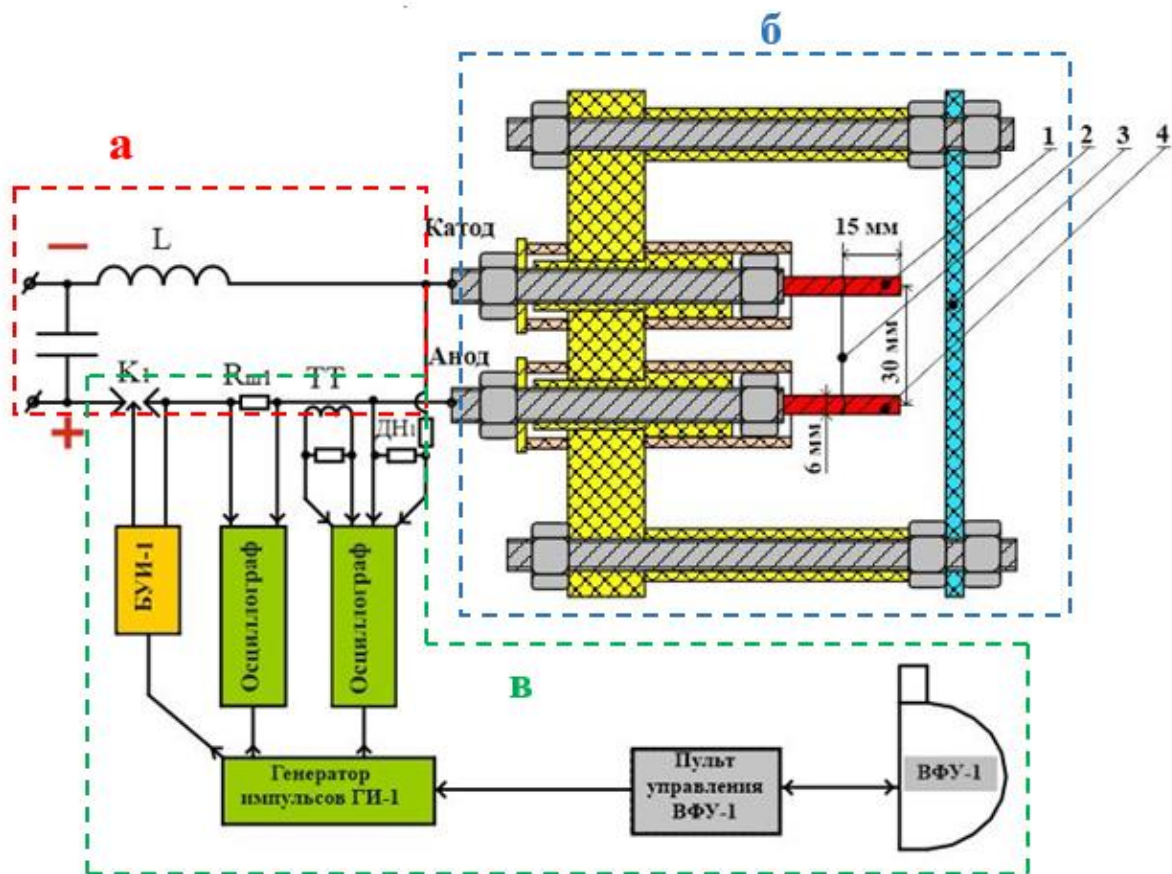


Рисунок 3 - Экспериментальная установка

Генератор импульсного тока (ГИТ) служит в качестве источника высоковольтных импульсов. В основе работы блока генерации импульсного тока лежит принцип накопления энергии в электрическом поле конденсатора. После зарядки конденсатор разряжается на нагрузку посредством управляемого коммутатора К (рис. 3).

Нагрузка представлена в виде макетного устройства (рис. 3б), предназначенного для инициирования искусственного КЗ, и состоит из электрода катода 1, медной проволоки 2, диэлектрика 3, катода анода 4.

Начало опыта иницируется зарядом конденсаторных батарей от источника постоянного тока. После замыкания контакта К следует разряд накопленной энергии конденсатора на нагрузку. Высокое значение разрядного тока приводит к моментальному сгоранию медной проволоки, что приводит к возникновению дуги.

Преимущества данной установки: возможность физического моделирования тока при КЗ через электрическую дугу, возможность моделирования импульсов токов большой величины, простота и доступность в конструировании. К недостаткам такой установки является опасность эксплуатации из-за наличия открытого огня.

2.1 Блок управления и регистрации

Основные элементы блока управления и регистрации приведены на рисунке 4.

Для измерения импульсного тока в разрядную цепь был включен шунт $R_{ш}$ с малым активным сопротивлением, что позволяет снизить выделяющееся на нем напряжение и не оказывать существенного влияния на цепь с большим измеряемым током. Измерение напряжения проводилось с помощью делителя напряжения, подключенному к макетному устройству.

Визуальная регистрация протекания тока дугового разряда производилась при помощи высокоскоростной фотокамеры ВФУ-1, управляемой с пульта 2 (рис. 4). Устройство БУИ-1 предназначено для автоматического управления коммутатором. Регистрация форм импульсов осуществлялась посредством осциллографа, на вход которого подавались сигналы тока и напряжения, поступающих делителя напряжения.

Шестиканальный генератор задержанных импульсов ГИ-1 (рис. 3) обеспечивает синхронизацию работы всех элементов рабочего цикла.

Разрядный контур выполнен на коаксиальных кабелях РК-50-13-17 длиной до 2 м.



Рисунок 4 - Блок управления и регистрации:

1- пульт управления стендом; 2 – пульт управления ВФУ-1; 3 – аппаратура регистрации и синхронизации

2.2 Параметры генератора импульсных токов

Исследование материалов контактов проводилось посредством генератора импульсных токов (ГИТ), реализуемого на основе источника энергии с колебательным LC-контуром, принципиальная схема которого представлена на рисунке 5. Составными частями ГИТ являются: трехфазный источник питания 380 В; трансформатор ТМ-63-10; диодный выпрямитель; емкостной накопитель с общей емкостью конденсаторной батареи $C = 48$ мФ (рис. 6а); катушки индуктивности $L = 210$ мкГн, рассчитанной на протекание токов короткого замыкания (рис. 6б).

Емкостной накопитель энергии состоит из 240 конденсаторов типа ИС5-200 напряжением 5кВ и емкостью 200 мкФ, обеспечивающих накопление

энергии $W_c = 600$ кДж. Конденсаторные батареи объединены в 16 модулей, состоящих из 15 конденсаторов. Напряжение на модулях конденсаторных батарей контролируется индивидуальными киловольтметрами. Каждый модуль коммутируется игнитронным разрядником типа ИРТ-6.

Параметры реактивных элементов установки подбирались эмпирически для достижения необходимой формы импульса.

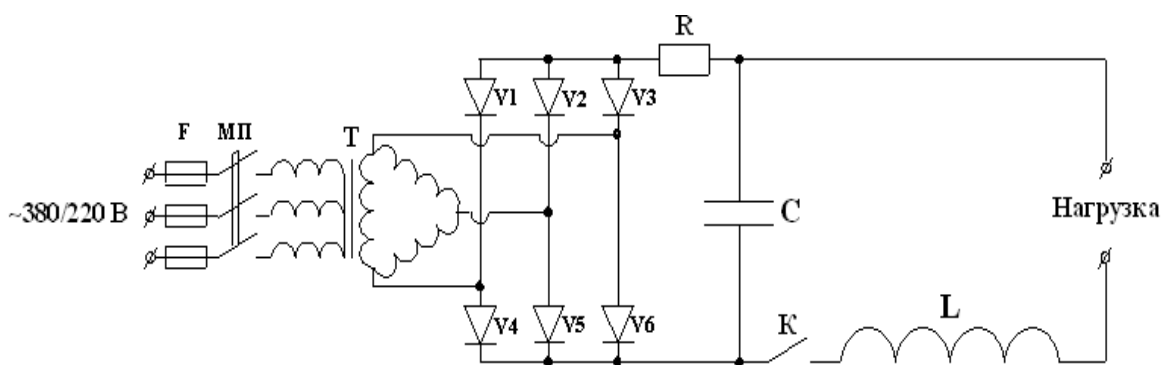


Рисунок 5 - Принципиальная схема источника с колебательным LC-контуром

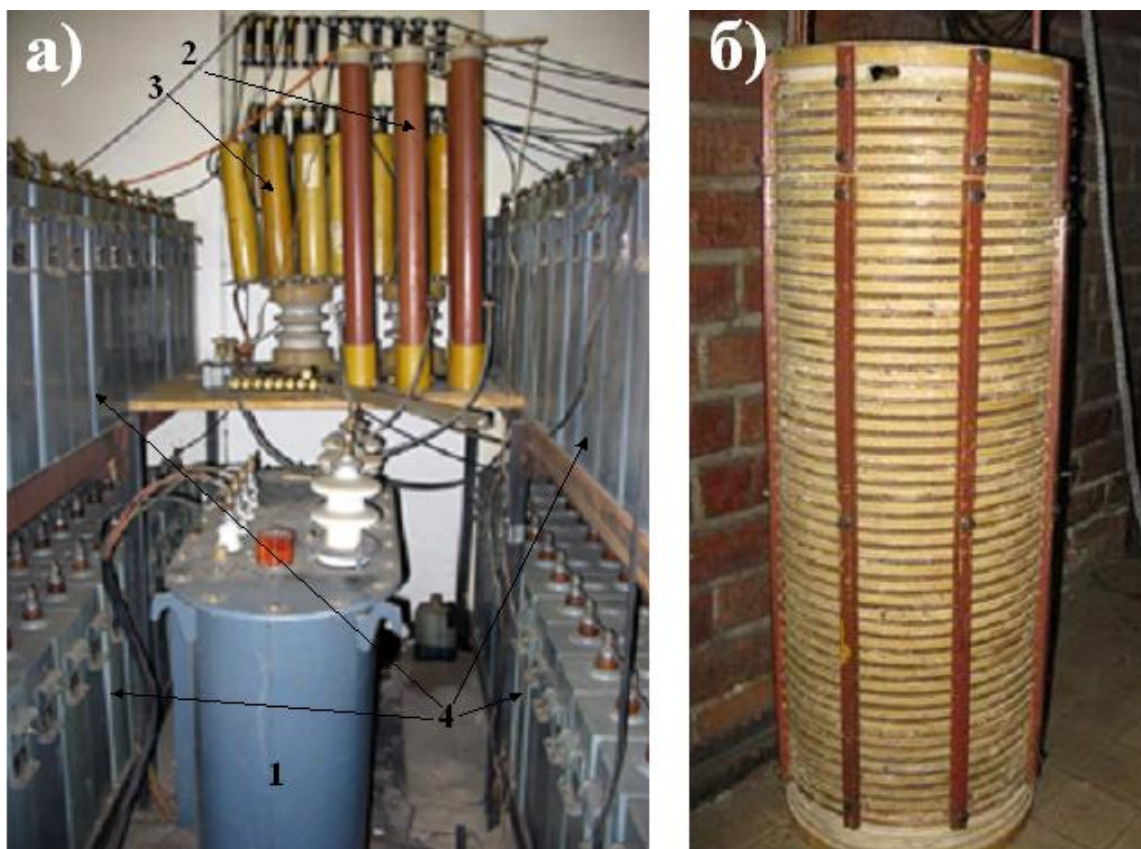


Рисунок 6 - Фрагменты ГИТ:

- а) 1 – трансформатор ТМ-63-10, 2 – выпрямитель, 3 – зарядные сопротивления, 4 – конденсаторные батареи; б) катушка индуктивности

Проверка корректности работы колебательного контура проводилась в режиме короткого замыкания. Для этого в качестве использовался проводник электрического тока с малым сопротивлением. Характеристика электрического тока приведена на осциллограмме рисунка 7.

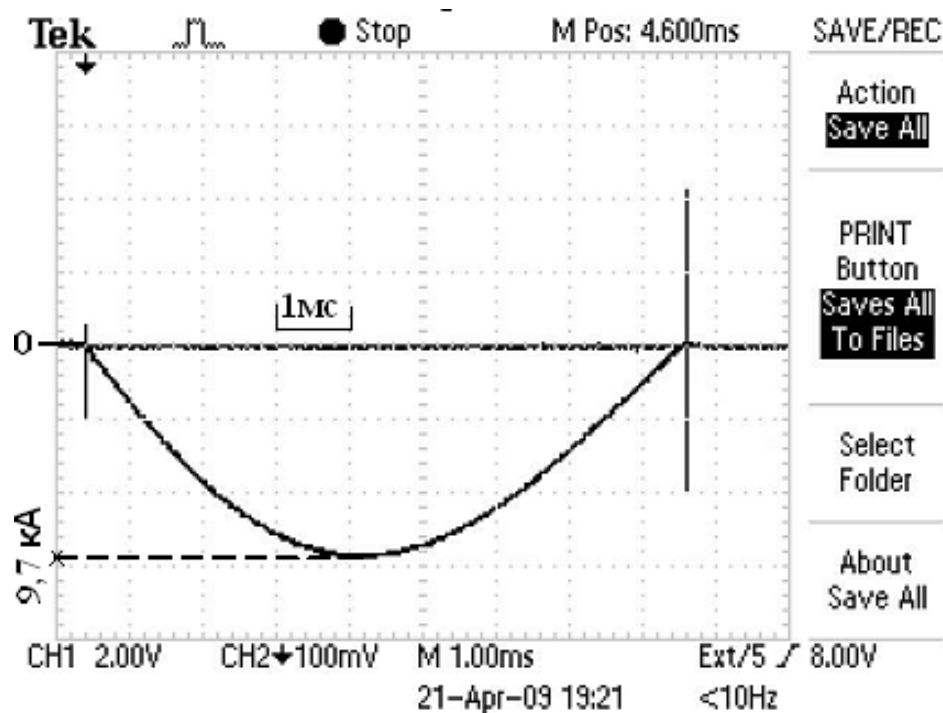


Рисунок 7 - Осциллограмма тока разрядного контура

По данным осциллограммы можно сделать вывод, что генератор импульсных токов выдает импульс тока синусоидальной формы с полупериодом 10 мс, который сопоставим с током короткого замыкания при частоте 50 Гц в сетях промышленного электроснабжения. Поэтому данная установка может применяться для исследования электроэрозионных свойств контактов выключателей.

2.3 Макетное устройство

Макетное устройство используется в качестве нагрузки и выполняет функции контактодержателя. В качестве электровзрывающего проводника была использована медная проволока диаметром 0,2 мм, а диэлектрическим материалом выбрано органическое стекло. Такой выбор материала диэлектрика обусловлен тем, что из него выполнены дугогасительные камеры

автоматических выключателей. Делитель напряжения подключается к макетному устройству в точках I и II (рис 8а).

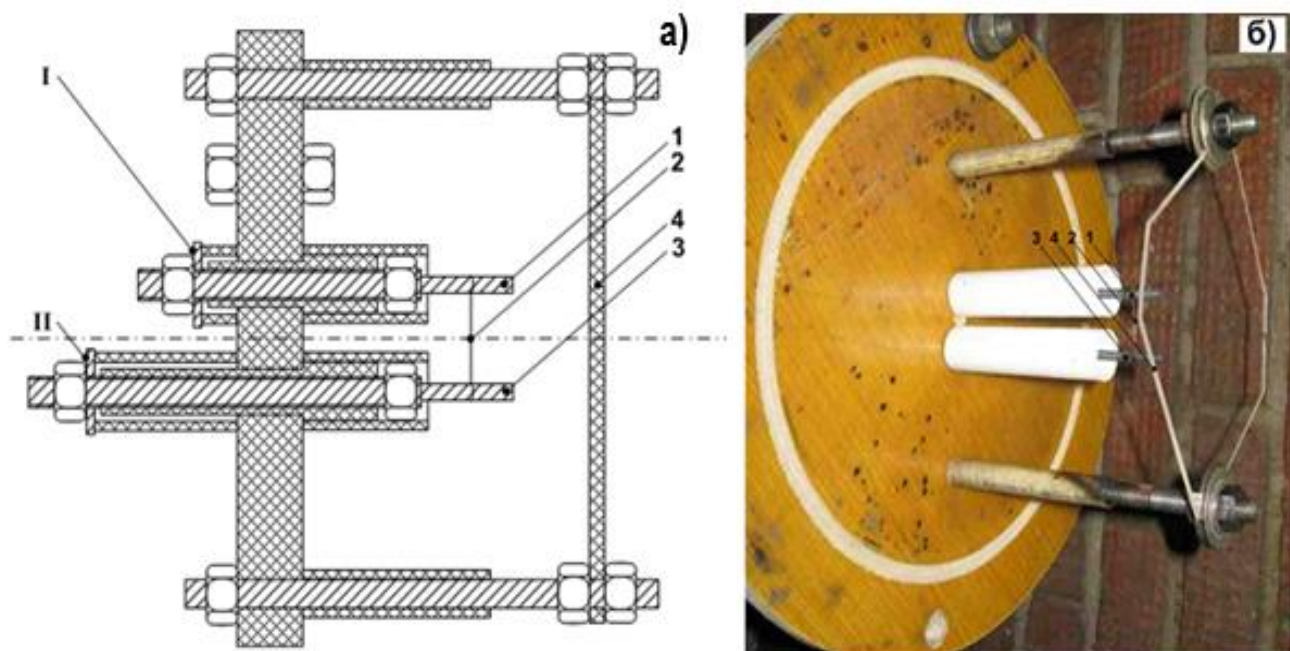


Рисунок 8 - Макетное устройство:

а) принципиальная схема, б) фотография: I и II – точки подключения делителя напряжения;
1 – электрод-катод; 2 – электровзрывающийся проводник; 3 – электрод-анод; 4 - диэлектрик

3 Методика эксперимента

Максимальное амплитудное значение тока короткого замыкания было принято $I_{кз.макс} = 25$ кА, исходя из статистических данных о значениях токов КЗ на промышленных предприятиях и гражданских объектах 0,4 кВ.

В качестве материала электродов использовались медь, сталь, вольфрам и сплав медь-вольфрам круглого сечения (диаметр 6,0 мм), длина электродов 30 мм, расстояние между осями электродов 30 мм.

При подключении установки ГИТ к источнику питания, происходит заряд конденсатора С постоянным током до установленного уровня напряжения. При замыкании контакта К (рис. 5) накопленная энергия передается в нагрузку и генерируется высоковольтный импульс. Разряд между электродами инициируется путем электровзрыва проводника. На рисунке 9 представлена осциллограмма тока и напряжения дугового разряда при опытах с электродами из меди (рис. 10).

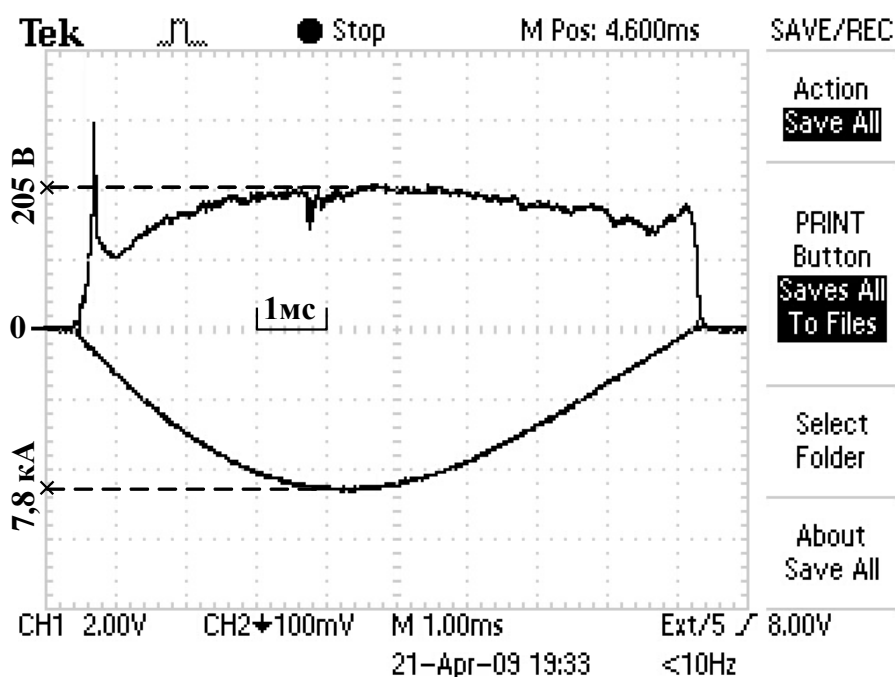


Рисунок 9 - Осциллограммы тока и напряжения



Рисунок 10 - Медные электроды после воздействия дуги отключения

По фотограмме, приведенной на рисунке 11, видно, что дуговой разряд по структуре неоднородный. Он состоит из плазменных струй, имеющих яркое свечение в центре, называемое ядром потока плазмы. Ядро дуги возникает в результате процессов магнитного сжатия ствола дуги и нагрева потоков плазмы из-за увеличения плотности тока в месте дуги. Ядро окружено плазмой с более низкой температурой, имеющей более слабое свечение.

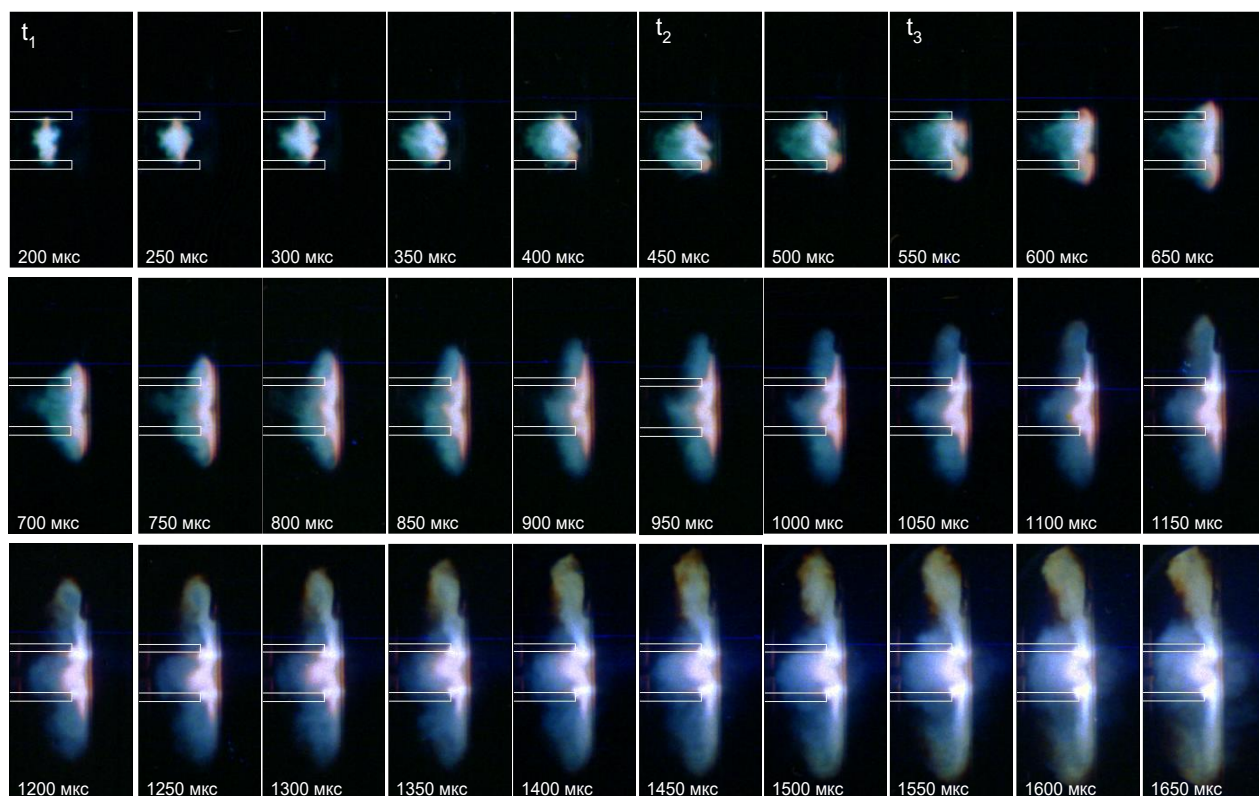


Рисунок 11 - Высокоскоростная фотограмма

В свою очередь, высокоэнтальпийные плазменные струи действуют на поверхность диэлектрического материала, оставляя на ней кратеры, что видно на рисунке 12.

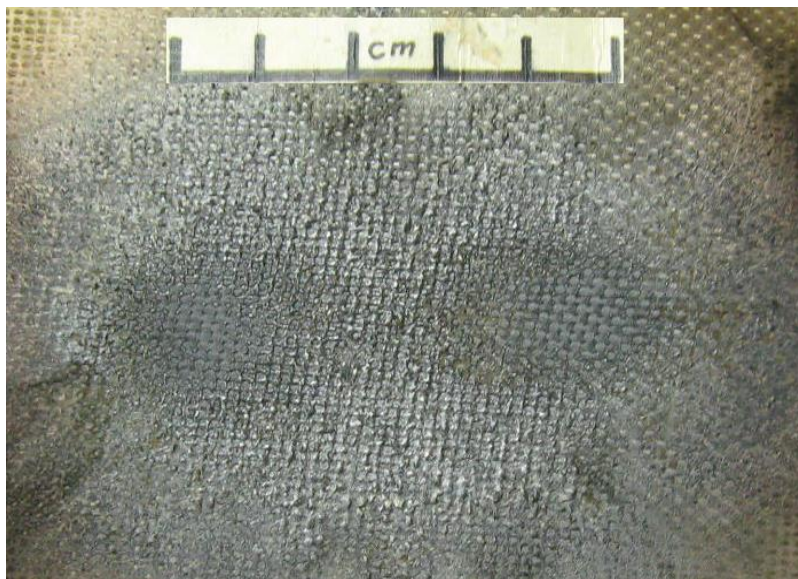


Рисунок 12 - Диэлектрический материал, после воздействия плазмы электрической дуги отключения

Аналогичные опыты были проведены и для контактов из вольфрама, железа и сплава медь-вольфрам. Измерение эрозии проводилось посредством взвешивания электродов до и после разряда на аналитических весах.

Удельная и средняя удельная эрозия определяются по формулам:

$$\bar{G}_a = \frac{\Delta m_a}{W},$$
$$\bar{G}_k = \frac{\Delta m_k}{W},$$
$$\bar{G} = \frac{\Delta m_a + \Delta m_k}{W},$$
$$\bar{G}_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{G}_i,$$

где Δm_a , Δm_k —унос массы электрода с анода и катода, г;

W —энерговыделение, кДж;

n —количество проведенных опытов.

В качестве примера приведен расчет удельной эрозии для опыта №1:

$$\bar{G}_a = \frac{0,15}{9,4} = 0,016 \text{ г/Дж}$$

$$\bar{G}_k = \frac{0,11}{9,4} = 0,012 \text{ г/Дж}$$

$$\bar{G}_{\text{ср.а}} = \frac{1}{6} \cdot (0,016 + 0,019 + 0,015 + 0,016 + 0,014 + 0,015) = 0,016 \text{ г/Дж}$$

$$\bar{G}_{\text{ср.к}} = \frac{1}{6} \cdot (0,012 + 0,014 + 0,011 + 0,011 + 0,01 + 0,011) = 0,012 \text{ г/Дж}$$

$$\bar{G} = \frac{0,15 + 0,11}{9,4} = 0,028 \text{ г/кДж}$$

$$\bar{G}_{\text{ср}} = \frac{1}{6} \cdot (0,028 + 0,033 + 0,026 + 0,027 + 0,025 + 0,027) = 0,028 \text{ г/Дж}$$

Экспериментальные и расчетные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные

Опыт	U _д , В	I _д , кА	W _д , кДж	Δm _а , г	Δm _к , г	\bar{G}_a , г/кДж	\bar{G}_k , г/кДж	$\bar{G}_{\text{ср.а}}$, г/кДж	$\bar{G}_{\text{ср.к}}$, г/кДж	\bar{G} , г/кДж	$\bar{G}_{\text{ср}}$, г/кДж
CuW											
1	224	7,8	9,4	0,15	0,11	0,016	0,012	0,016	0,012	0,028	0,028
2	218	7,5	8,0			0,019	0,014				
3	230	7,8	9,9			0,015	0,011				
4	233	7,7	9,6	0,15	0,11	0,016	0,011				
5	238	8,1	10,5			0,014	0,010				
6	241	7,6	9,7			0,015	0,011				
Cu											
7	261	7,8	11,2	0,46	0,48	0,041	0,043	0,049	0,05	0,099	0,099
8	243	6,7	7,2			0,064	0,067				
9	282	7,5	9,9			0,046	0,048				
10	264	7,5	9,7	0,50	0,50	0,052	0,052				
11	256	6,8	8,1			0,062	0,062				
12	283	7,8	11,7			0,043	0,043				
13	252	7,6	10,7	0,47	0,50	0,044	0,047				
14	261	7,6	10,7			0,044	0,047				
15	261	7,6	10,9			0,043	0,046				
W											
16	262	7,8	10,9	0,62	0,24	0,057	0,022	0,05	0,021	0,071	0,071
17	263	7,6	10,7			0,058	0,022				
18	272	7,8	11,7			0,053	0,021				
19	271	7,8	11,2	0,58	0,23	0,052	0,021				
20	271	7,2	9,1			0,064	0,025				

Продолжение таблицы 1

21	274	7,8	11,8			0,049	0,019			0,069	
22	267	7,8	11,1	0,44	0,24	0,040	0,022			0,061	
23	271	7,9	12,4			0,035	0,019			0,055	
24	273	7,6	11,1			0,040	0,022			0,061	
Fe											
25	242	7,8	10,1	0,11	0,38	0,011	0,038			0,049	
26	233	6,8	7,0			0,016	0,054			0,070	
27	241	6,8	7,7			0,014	0,049			0,064	
28	242	7,8	10,3	0,19	0,48	0,018	0,047	0,018	0,046	0,065	0,064
29	254	7,9	10,5			0,018	0,046			0,064	
30	252	7,6	10,0			0,019	0,048			0,067	
31	242	7,5	10,0	0,23	0,49	0,023	0,049			0,072	
32	242	8,0	11,2			0,021	0,044			0,064	
33	254	7,8	11,5			0,020	0,043			0,063	

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В основной части выпускной квалификационной работы было проведено исследование электроэрозионной стойкости электрических контактов, выполненных из меди, железа, вольфрама и сплава медь-вольфрам.

Задача выполнения данного раздела состоит в том, чтобы определить перспективность данной научно-исследовательской работы. Данная задача выполняется в ходе рассмотрения вопросов:

1. планирования научно-исследовательской работы;
2. формирования бюджета научно-технической работы;
3. оценки коммерческого потенциала проведения научного исследования;
4. оценки социальной эффективности.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями результатов исследования являются специалисты в области электротехнического материаловедения, конструкторы коммутационных аппаратов до 1000 В, научные работники, студенты. Карта сегментирования рынка представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Карта сегментирования рынка

		Отрасли		
		Научные институты	Научно-исследовательские лаборатории	Электротехнические компании
Сфера деятельности	Научно-исследовательская работа			
	Проектирование коммутационной аппаратуры			

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Конкурентоспособность научной разработки определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i,$$

где V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Оценочная карта строится для сравнения технических и экономических параметров трех вариантов автоматических выключателей одного номинала с исполнением контактов:

- IEK с медными контактами ($B_{к1}$);
- Schneider Electric с контактами медь-вольфрам ($B_{к2}$);
- АВВ с контактами медь-хром ($B_{к2}$).

Показатели веса критерия в совокупности должны составлять единицу, оценка показателя производится по пятибалльной шкале. Результат оценки конкурентных технических решений приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес кр-ия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{к1}$	$B_{к2}$	$B_{к3}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$	$K_{к3}$
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Чувствительность	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
2. Быстродействие	0,2	4	5	4	0,8	1	0,8
3. Коммутационный ресурс	0,2	3	5	4	0,6	1	0,8
Экономические критерии оценки эффективности							
4. Стоимость	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
5. Затраты на обслуживание	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
6. Срок эксплуатации	0,3	3	5	4	0,9	1,5	1,2
Итого	1	23	27	25	3,6	4,7	4,1

По результатам сравнения можно сделать вывод, что контакты медь-вольфрам хоть и дороже, но они полностью окупают себя за счет большего срока эксплуатации.

4.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой сводную таблицу, иллюстрирующую связь между внутренними и внешними факторами компании. Целью данного анализа является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Сильные и слабые стороны исследовательской работы приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Уникальность исследования С2. Наличие поставщика материалов для исследования С3. Широкая область применения С4. Исследование на базе лабораторий ТПУ	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Упрощенность экспериментальной установки Сл2. Погрешности измерительной аппаратуры Сл3. Наличие других исследовательских работ
Возможности: В1. Отсутствие конкурентных технологий В2. Расширение сотрудничества с производствами В3. Усовершенствование метода исследования	В1С2 В1С3 В1С4 В2С1 В2С2 В2С3 В3С2 В3С3 В3С4	В2Сл1 В2Сл2 В3Сл1 В3Сл2
Угрозы: У1. Отказ в финансировании У2. Усовершенствование материала У3. Ненадежное экспериментальное оборудование У4. Нехватка материала для исследования	У1С1 У1С2 У2С3 У2С4 У3С2 У4С2 У4С3 У4С4	У1Сл1 У2Сл2 У2Сл3 У3Сл1 У3Сл2

В таблицах 5 – 8 приведены интерактивные матрицы исследовательской работы.

Таблица 5 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны–возможности»

Возможности	Сильные стороны				
		<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>
	<i>B1</i>	-	+	+	+
	<i>B2</i>	+	+	+	-
	<i>B3</i>	-	+	+	+

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны – угрозы»

Угрозы	Сильные стороны				
		<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>
	<i>У1</i>	+	+	-	-
	<i>У2</i>	-	-	+	+
	<i>У3</i>	-	+	-	-
<i>У4</i>	-	+	+	+	

Таблица 7 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны – возможности»

Возможности	Слабые стороны			
		<i>Сл1</i>	<i>Сл2</i>	<i>Сл3</i>
	<i>B1</i>	-	-	-
	<i>B2</i>	+	+	-
	<i>B3</i>	+	+	-

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны – угрозы»

Угрозы	Слабые стороны			
		<i>Сл1</i>	<i>Сл2</i>	<i>Сл3</i>
	<i>У1</i>	+	+	-
	<i>У2</i>	-	-	+
	<i>У3</i>	+	+	-
<i>У4</i>	-	-	-	

4.4 Инициация проекта

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1. цели и результат проекта;
2. организационную структуру проекта.

В таблицах 9 – 10 приводится информация о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 9 - Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Электротехнические компании	Получение результатов исследования и применение с целью усовершенствования коммутационной аппаратуры
Научный руководитель	Научные разработки, публикации
Студент	Выполнение выпускной квалификационной работы

Таблица 10 - Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, календарные дни
1	Герасимов Д.Ю., ТПУ, доцент	руководитель исследования	Составление плана проведения исследования, консультация по вопросам ВКР	22
2	Борисова М.С., ТПУ, магистр	выполнение и защита	Анализ литературы, лабораторные испытания, анализ результатов испытания	85
ИТОГО:				107

4.5 Планирование научно-исследовательским проектом

В рамках планирования научного проекта был построен календарный и сетевой графики проекта. Линейный график представлен в виде таблицы 11.

Ожидаемое значение трудоемкости $t_{ожі}$ определяется по формуле:

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot t_{\min i} + 2 \cdot t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{\min} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Перевод длительности каждого этапа работ в календарные дни производится по формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Коэффициент календарности на 2021 год:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 92 - 30} = 1,5$$

Отсюда продолжительность первой работы в календарных днях:

$$T_{ki} = 5 \cdot 1,5 = 7,5 \approx 8 \text{ дн}$$

Для иллюстрации календарного плана проекта строится диаграмма Ганта, приведенная в таблице 12, где период времени выполнения научной работы разбивается по месяцам и декадам (10 дней).

Таблица 11 - Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение задания	5	10.02.21	15.02.21	Герасимов Д.Ю.
2	Подбор и изучение материалов по теме работы	14	15.02.21	1.03.21	Борисова М.С.
3	Проверка выполненного задания	1	1.03.21	02.03.21	Герасимов Д.Ю.
4	Изучение параметров экспериментальной установки	3	02.03.21	5.03.21	Борисова М.С.
5	Изучение техники безопасности	1	8.03.21	8.03.21	Герасимов Д.Ю. Борисова М.С.
6	Проведение экспериментов	15	9.03.21	24.03.21	Герасимов Д.Ю. Борисова М.С.
7	Анализ результатов экспериментов	14	25.03.21	7.04.21	Борисова М.С.
8	Проверка результатов анализа	1	7.04.21	8.04.21	Герасимов Д.Ю.
9	Составление отчета по работе	31	8.04.21	31.05.21	Борисова М.С.
ИТОГО:		85			

Таблица 12 - Календарный план-график проведения проектирования

№	Кол-во дней	Продолжительность выполнения работ											
		Февраль			Март			Апрель			Май		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	5	■	■										
2	14		■	■									
3	1				■								
4	3				■								
5	1					■							
6	15					■	■						
7	14							■	■				
8	1									■			
9	31										■	■	■

■ – руководитель; ■ – студент.

4.6 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).

4.6.1 Основные материальные затраты исследования

Стоимости всех материалов, используемых при разработке проекта приведены в таблице 13. В стоимость материальных затрат включается транспортно-заготовительные расходы (3% от цены). Стоимость спецоборудования учитывается с затратами по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены.

Таблица 13 - Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Общая стоимость, руб.
Затраты на материалы				
Электроэнергия	кВт·ч	2,1	3,66	8
Образцы контактов	шт	33	72	2310
Соединительные провода	м.	5	200	1000
Печать ВКР	лист	90	3	270
Папка скоросшиватель	шт	1	50	50
Затраты на оборудование				
Конденсатор	шт	1	16000	18400
Катушка индуктивности	шт	1	3203	3683
Выпрямитель	шт	3	600	2070
Контактодержатель	шт	1	1000	1150
Оргстекло	шт	2	800	1840
Высокоскоростная камера	шт	1	25000	28750
Разрядник	шт	1	1026	1179,9
Итого:				60711

4.6.2 Основная заработная плата

Полная заработная плата включает основную и дополнительную заработную плату и определяется как:

$$Z_{\text{полн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Основная заработная плата руководителя, лаборанта рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: 10,4;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}}) \cdot k_{\text{р}},$$

$Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 для города Томск.

Размер заработной платы по тарифной ставке определяется по формуле:

$$Z_{TC} = T_{ci} \cdot k_T,$$

где T_{ci} – тарифная ставка работника;

k_T – тарифный коэффициент в зависимости от ставки.

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$Z_M = 35000 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 59150 \text{ руб.}$$

$$Z_{дн} = \frac{59150 \cdot 10,4}{251} = 2450,84 \text{ руб.}$$

$$Z_{осн} = 2450,84 \cdot 5 = 12254,2 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для инженера:

$$Z_M = 15000 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 25350 \text{ руб.}$$

$$Z_{дн} = \frac{25350 \cdot 10,4}{251} = 1050,36 \text{ руб.}$$

$$Z_{осн} = 1050,36 \cdot 120 = 126043,2 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведем в таблице 14.

Таблица 14 - Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	$k_{пр}$	k_p	Z_M , руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	35000	0,3	1,3	59150	2450,84	5	12254,2
Инженер	15000	0,3	1,3	25350	1050,36	120	126043,2
Итого:							138297,4

Отразим обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot Z_{осн},$$

$k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды составляет 30,2%, приведем их в таблице 15.

Таблица 15 - Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.
Руководитель	12254,2
Инженер	126043,2
Коэффициент отчислений	0,302
Итого:	41765,81

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 16.

Таблица 16 - Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты	60711
2. Основная заработная плата	138297,4
3. Отчисления во внебюджетные фонды	41765,81
Бюджет затрат:	240774,8

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления). Бюджет затрат составил 240774,8 рублей.

4.7 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин:

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}},$$

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_{\text{pi}} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 17.

Таблица 17 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,3	5	3
2. Удобство в эксплуатации	0,1	4	4
3. Помехоустойчивость	0,1	4	4
4. Энергосбережение	0,1	4	4
5. Надежность	0,2	4	4
6. Материалоемкость	0,2	3	4
Итого:	1		

$$I_{\text{ТП}} = 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,2 = 4,1$$

$$I_{\text{аналог}} = 3 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 = 3,7$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки $I_{\text{исп.}i}$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p-\text{исп.}i}}{I_{\text{финр.}i}}$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}}$$

Таблица 18 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
	Интегральный финансовый показатель разработки	1,05	1
	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,1	3,7
	Интегральный показатель эффективности	3,9	3,7
	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,054	

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом, основываясь на показателях эффективности.

5 Социальная ответственность

В данном разделе рассматриваются правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, производится анализ вредных и опасных факторов, воздействующих на персонал и природу при проведении лабораторного исследования, а также разработка мер по их снижению.

Выпускная квалификационная работа посвящена исследованию электроэрозионной стойкости контактных элементов при коммутации высоковольтной электрической дуги. Автоматические выключатели позволяют осуществлять не только коммутационные операции, а также являются аппаратами защиты элементов электрической цепи от сверхтоков. В связи с чем существует необходимость повышения их надежности и увеличение износостойкости контактных элементов. Одним из способов достижения поставленных задач является изготовление контактов из материалов наиболее стойких к электрической эрозии.

Результаты исследования в дальнейшем могут применяться при проектировании коммутационных аппаратов.

Лабораторные исследования проводятся в лаборатории магнито-плазменных технологий ТПУ. Площадь лаборатории составляет 50 м².

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Работа за лабораторной установкой относится ко второй категории труда – работы выполняются при оптимальных условиях внешней производственной среды и при оптимальной величине физической, умственной и нервно-эмоциональной нагрузки, с продолжительностью рабочего дня не превышающей 40 часов в неделю с возможным сокращением рабочего времени и обязательным перерывом на обед [13, 14].

Рабочее место персонала организовано согласно основным эргономическим требованиям, регулируемым при работе стоя ГОСТ 12.2.033-78 [15], при работе сидя ГОСТ 12.2.032-78 [16]:

- монитор, клавиатура и корпус компьютера должны находиться прямо перед оператором; высота рабочего стола с клавиатурой должна составлять 68 – 80 см над уровнем пола;
- монитор должен находиться от оператора на расстоянии 60 – 70 см на 20 градусов ниже уровня глаз;
- рабочее кресло должно иметь мягкое сиденье и спинку, с регулировкой сиденья по высоте, с удобной опорой для поясницы;
- положение тела пользователя относительно монитора должно соответствовать направлению просмотра под прямым углом или под углом 75 градусов.

Правильное положение при работе за компьютером является весьма важно для исключения нарушений в опорно-двигательном аппарате и возникновения синдрома постоянных нагрузок (рис 13).

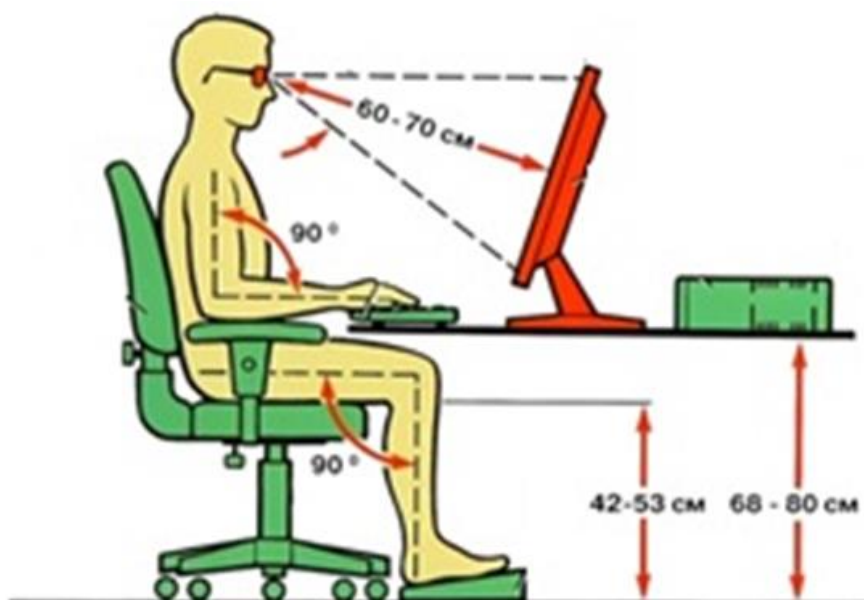


Рисунок 13 - Организация рабочего места за компьютером

Организация электрической и пожарной безопасности лаборатории соответствует требованиям [17, 18]:

- обязательное прохождение инструктажа по технике безопасности независимо от должности и уровня образования персонала;
- все электрооборудование с напряжением свыше 36 В, а также оборудование и механизмы, которые могут оказаться под напряжением, заземлены;
- для отключения электросетей на вводах должны быть рубильники или другие доступные устройства. Отключение всей сети, за исключением дежурного освещения, производится общим рубильником.

В целях предупреждения получения электрических травм запрещается [5, 6]:

- работать на неисправных электрических приборах и установках;
- перегружать электросеть;
- переносить и оставлять без надзора включенные электроприборы;
- работать вблизи открытых частей электроустановок, прикасаться к ним;
- загромождать подходы к электрическим устройствам.

5.2 Производственная безопасность

Опасные и вредные факторы, воздействующие на персонал лаборатории, идентифицируются согласно ГОСТ 12.0.003-2015 [19]. Источниками опасных факторов в лаборатории является в первую очередь электрооборудование, которое может причинить травмы сотрудникам лаборатории. Главными опасными факторами являются поражение электрическим током, а также получение травм от воздействия составных частей оборудования. Перечень опасных и вредных факторов представлен в таблице 19.

В зависимости от продолжительности воздействия вредные производственные факторы могут вызывать ухудшение самочувствия, вызывать рассеянность, тошноту, ухудшение зрения. Опасные производственные факторы вызывают повреждения кожных покровов. При поражении электрическим током возможны ожоги различной степени тяжести, остановка дыхания, поражение

центральной нервной системы человека, а также летальный исход. При повреждении составными частями электрооборудования могут быть гематомы, открытые раны, переломы.

Таблица 19 - Опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)		Этапы работ			Нормативные документы
		Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Вредные	Отклонение показателя микроклимата	+	+	+	Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
	Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.
	Превышение уровня вибрации		+	+	ГОСТ 12.1.012-2004. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования.
	Превышение уровня шума	+	+	+	СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы.
	Превышение уровня напряженности магнитного поля		+	+	СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы
Опасные	Воздействие электрического тока	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов
	Получение производственных травм частями производственного оборудования	+	+	+	ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности

Отклонение показателя микроклимата

Показатели микроклимата в рабочих помещениях определяются следующими параметрами:

- температура воздуха в рабочем помещении;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха на рабочем месте;

Для обеспечения установленных норм параметров микроклимата предусмотрена система обогрева помещения и вентиляция. Показатели микроклимата нормируются в зависимости от степени тяжести, основываясь на энергетические возможности организма человека. Энергозатраты инженера-исследователя относятся к степени Ib, с количеством затрачиваемой энергии 140- 174 ккал/ч: работа, производимая сидя и стоя связанная с движением и некоторым напряжением. Комфортная атмосфера для работы в разное время года приведена в таблице 20 согласно [20].

Таблица 20 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха	
				ниже опт. величины	выше опт. величины
Оптимальные величины					
Холодный	21-23	20-24	60-40	0,1	
Теплый	22-24	21-25			
Допустимые величины					
Холодный	19-20,9	18-25	15-75	0,1	0,2
Теплый	20-21,9	19-29		0,1	0,3

Превышения уровня шума

В лаборатории источниками шума и вибрации является электрооборудование: компрессор, вентиляция, станки и электроинструмент. Превышение уровня шума приводит к ухудшению уровня слуха, раздражительности, быстрой утомляемости, а также различным заболеваниям нервной и сердечно-сосудистой систем. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука в лаборатории следует принимать по данным таблицы 21 согласно [21].

Таблица 21 - Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука

Среднегеометрические частоты, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Нормативные значения, дБ	103	91	83	77	73	70	68	66	64
Уровень звука и эквивалентный уровень звука (в дБА)	75								

В лаборатории главными методами защиты персонала от шума является установка на оборудование металлических кожухов, установка оборудования в отдельные залы и управление ими из другого помещения, установка звукопоглощающих обшивок. Так же в основные методы защиты входит обеспечение каждому сотруднику в лаборатории персональных средств индивидуальной защиты(СИЗ): беруши и наушники.

Превышение уровня вибрации

Вибрация относится к числу факторов, обладающих высокой биологической активностью. Длительное воздействие вибрации на рабочего может привести к возникновению у него головокружения, расстройству координации движений, вестибулярной неустойчивости, укачиванию, нарушению зрения. Существует два вида нормирования вибрации: санитарно-гигиеническое и техническое. Санитарно-гигиеническое нормирование регламентирует параметры производственной вибрации и правила работы с виброопасными механизмами и оборудованием. Такие параметры регламентируются согласно [22] и [23].

В качестве индивидуальной защиты от вибрации выступают защитные перчатки, одежда и обувь, снабженные вибродемпфирующим материалом.

Составные части производственного оборудования и механизмы

Источниками опасности для персонала за различными механизмами, прежде всего, являются различные движущиеся части механизмов. Основные последствия механических опасностей:

— защемление или раздавливание;

- порезы;
- отрезание или разрубание;
- попадание под удар;
- поверхностное повреждение наружных тканей под действием трения.

Требования безопасности к применению ограждений в зависимости от расположения опасных элементов устанавливает [24]:

- все выступающие вращающиеся или двигающиеся части производственных установок должны быть надежно ограждены (закрыты) кожухами, причём их конструкция должна обеспечивать возможность наблюдения за движущимися частями механизмов;
- ограждения не должны ограничивать технологических возможностей оборудования;
- ограждения и предохранительные приспособления не должны ни увеличивать уровень шума, создаваемый движущимися деталями оборудования, ни снижать освещённость рабочего места;
- на наружную сторону ограждения следует нанести или закрепить предупреждающий знак.

Опасность поражения электрическим током

Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляются в виде электротравм и заболеваний. Степень опасного воздействия на человека электрического тока и электрической дуги зависит от: величины напряжения прикосновения, электрического сопротивления тела человека, силы тока, протекающей через него; продолжительности воздействия электрического тока и электрической дуги.

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц. В соответствие с ПУЭ [17] по степени опасности поражения электрическим током лаборатория относится к

помещениям с повышенной опасностью, так как присутствует возможность одновременного соприкосновения с имеющими соединение с землей металлическими предметами и металлическими корпусами оборудования.

Данные организационные мероприятия в полном объеме применимы на промышленных предприятиях. При проведении очередного эксперимента оформляется опыт-лист, где помимо параметров эксперимента указывается персонал, находящийся во время подготовки и выполнения эксперимента. Допуски и надзор во время этого осуществляет научный руководитель.

При подготовке рабочего места для работ со снятием напряжения оперативным персоналом должны быть выполнены в указанном порядке следующие мероприятия [17, 25]:

- произведены необходимые отключения и приняты меры, препятствующие подаче напряжения к месту работы вследствие ошибочного или самопроизвольного включения коммутационной аппаратуры;
- на приводах ручного и ключах дистанционного управления коммутационной аппаратурой вывешены запрещающие плакаты («Не включать, работают люди», «Не включать работа на линии») и при необходимости установлены ограждения;
- присоединены к «земле» переносные заземления, проверено отсутствие напряжения на токоведущих частях, на которых должно быть наложено защитное заземление для защиты людей от поражения электрическим током;
- непосредственно после проверки отсутствия напряжения должно быть наложено заземление;
- вывешены предупреждающие плакаты и предписывающие плакаты.

Поражения электрическим током при прикосновении к незаизолированным токоведущим частям можно избежать соблюдением правил техники безопасности, обеспечением хорошего освещения высоковольтного

оборудования в лаборатории, применением защитного заземления, сооружением контура заземления и защитных ограждений.

Превышение уровня напряженности магнитного поля

Для проведения эксперимента в установке используются различные высоковольтное оборудование (емкостные накопители энергии, электрическая система управления и зарядки) на рабочий персонал будет воздействовать такой вредный фактор, как электромагнитные поля. Интенсивное воздействие электромагнитного поля промышленной частоты вызывает у работающих нарушение работы центральной, нервной и сердечно-сосудистой систем. Воздействие электромагнитного поля на человека принято оценивать количеством поглощаемой электромагнитной энергии. Величина электромагнитных полей (таблица 22) нормируется согласно [26].

Таблица 22 – Предельно допустимые уровни напряженности периодического магнитного поля частотой 50 Гц [26]

Время пребывания, ч	Допустимые уровни МП/МИ, [А/м]/[мкТл]	
	Общее воздействие	Локальное воздействие
<1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Для помещений с электрооборудованием, установлены нормы на предельно допустимые напряженности электрического поля промышленной частоты согласно [27].

С целью снижения влияния полей на персонал в лаборатории во время проведения экспериментов необходимо применять средства коллективной защиты. Таковыми являются экранирующие устройства.

Недостаточная освещенности рабочей зоны

Недостаточный уровень освещенности рабочей зоны приводит к быстрому утомлению и ухудшению зрения. Нормы рабочего места должны

соответствовать требованиям [28]. Для научно-технической лаборатории уровень освещенности должен составлять 400 лк.

Оценка уровня освещенности лаборатории производится методом коэффициента использования светового потока. Лаборатория имеет площадь 50 м² с осветительными установками типа OSRAM L36W/765 и OSRAM L18W/640 при их расположении, приведенном на рисунке 14.

Освещенность определяется по формуле:

$$E = \eta \cdot \frac{\Phi}{S},$$

где η – коэффициент светового потока, зависящий от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью.

Φ – световой поток лампы, установленной в светильник;

S – площадь освещаемого помещения, м².

Световой поток лампы:

$$\Phi = f \cdot n,$$

где f – световой поток лампы в зависимости от мощности, по паспортным данным завода изготовителя;

n – число ламп в светильнике.

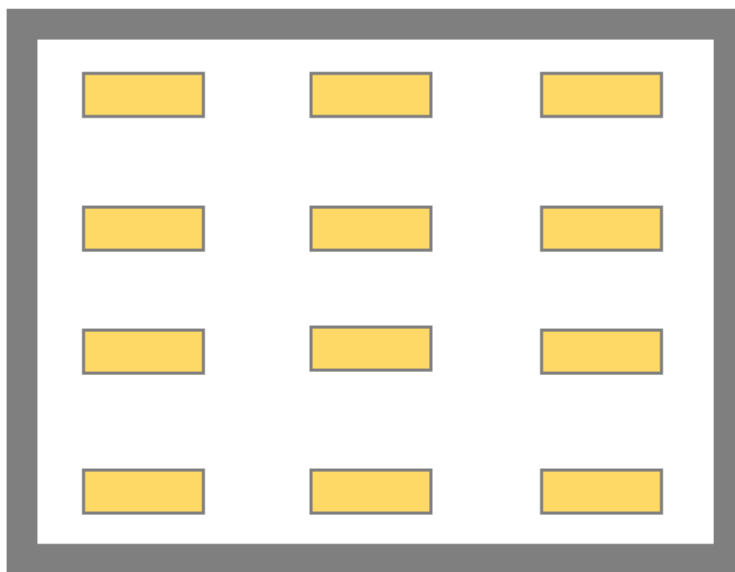


Рисунок 14 - План размещения светильников

Индекс помещения определяется формулой:

$$i = \frac{S}{(A + B) \cdot h},$$

где A и B – длина и ширина помещения, м;

h – высота светильника над рабочей поверхностью, м.

Световой поток ламп:

$$\Phi = 2760 \cdot 6 + 1200 \cdot 16 = 35760 \text{ лм}$$

Индекс помещения:

$$i = \frac{50}{(7 + 7,2) \cdot 2,7} = 1,3$$

Отсюда коэффициент светового потока составляет $\eta = 49\%$, тогда уровень освещенности составляет:

$$E = 0,49 \cdot \frac{45000}{50} = 441 \text{ лк}$$

Уровень освещенности в лаборатории соответствует установленным нормам.

5.3 Экологическая безопасность

Источниками загрязнения окружающей среды при выполнении опытов служат: пары металлов, электроизоляционный материал, металлические контакты.

В случае выхода из строя лабораторного оборудования, происходит списание с последующим отправлением специальным предприятиям для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах.

К жидким отходам относятся бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки лаборатории при пользовании водопроводом, которые сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях [29,30].

При подготовке к выполнению эксперимента некоторые процедуры сопровождаются нагревом, образованию паров выделением в атмосферу через вентиляцию загрязняющих веществ.

К газообразным отходам, загрязняющим воздух, относятся естественные выделения – углекислый газ, пары воды, пары металла, летучие органические соединения, пыль. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает загрязнение атмосферы.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В лабораторных условиях источниками чрезвычайных ситуаций могут служить: неисправность электрического оборудования, нарушение правил эксплуатации электроустановок, нарушение правил пожарной безопасности.

Основными мерами для предотвращения пожаров являются соблюдение всех стандартов по проектированию и строительству зданий и сооружений, своевременная проверка и ремонт электрооборудования, а также соблюдение правил пожарной безопасности.

Пожарно-профилактические мероприятия соответствуют требованиям изложенных в [31, 32]:

- организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта;
- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;
- технические и конструктивные мероприятия, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Организационные мероприятия:

- Противопожарный инструктаж обслуживающего персонала;
- Обучение персонала правилам техники безопасности;
- Издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия:

- Соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
- Обеспечение свободного подхода к оборудованию;
- Содержание в исправном состоянии изоляции токоведущих проводников.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение правил технической эксплуатации электротехнического оборудования, надлежащая планировка территории вуза и размещения на ней технических зданий и сооружений, соблюдение противопожарных разрывов в стенах зданий и сооружений, правильное размещение выходов и аварийного освещения.

Комплектация первичных средств пожаротушения соответствует [33]. Для предотвращения возникновения чрезвычайной ситуации в помещении лаборатории установлена пожарная сигнализация со звуковым оповещением. План эвакуации в случае возникновения ЧС представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 - План эвакуации цокольного этажа учебного корпуса №8

Заключение

Целью выпускной квалификационной работы было проведение исследования электроэрозионной стойкости контактных элементов в условиях коммутации силовоточной дуги. В ходе проведения исследования была описана экспериментальная установка (рис. 3), позволяющая производить процесс физического моделирования тока короткого замыкания. Опытным путем были определены параметры генератора импульсных токов, позволяющие смоделировать импульс тока короткого замыкания в сетях промышленного и гражданского электроснабжения частотой 50 Гц, приведенного на рисунке 7.

По данным, полученным в результате исследования были рассчитаны значения удельной эрозии для анода и катода, а также определено среднее значение удельной эрозии. Экспериментальные и расчетные данные представлены в таблице 1.

По результатам расчета было установлено, что из представленных образцов, контакты, выполненные из сплава медь-вольфрам, имеют наибольшую стойкость к электрической эрозии.

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» было установлено, что потенциальным потребителем результатов исследования являются специалисты в области электротехнического материаловедения, конструкторы коммутационных аппаратов до 1000 В, научные работники, студенты. Определены сильные и слабые стороны проекта посредством SWOT-анализа, выявлены возможности и угрозы для реализации проекта.

В процессе планирования научно-исследовательского проекта построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

При планировании бюджета рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды. Бюджет затрат составил 240774,8 рублей.

Оценка эффективности исследования показала, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

В результате выполнения раздела «Социальная ответственность» были произведен анализ нормативно-правовой базы по безопасному проведению исследований в лабораторных условиях. Определены вредные и опасные производственные факторы, воздействующие на персонал лаборатории, а также рассмотрены мероприятия и пути по их ограничению.

Были рассмотрены параметры микроклимата и правильной организации рабочего места сотрудника. Уровень освещенности лабораторного помещения, определенный расчетным путем, соответствует требуемому уровню. Рассмотрены основные правила по эксплуатации лабораторной установки, обеспечивающие электробезопасность.

В подразделе экологической безопасности были определены источники загрязнения окружающей среды в ходе проведения исследования, что позволит предпринять меры по снижению загрязнения. В результате оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций, было установлено, что наиболее вероятным ЧС в лабораторных условиях является - пожар. Рассмотрены пожарно-профилактические мероприятия и приведен план эвакуации персонала в случае возникновения ЧС.

Список используемой литературы

1. Петрова Л.Г., Потапов М.А., Чудина О.В. Электротехнические материалы: Учебное пособие / МАДИ (ГТУ). – М., 2008. - 198 с.
2. M. Braunovic, N.K. Myshkin, V.V. Konchits, Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology, CRC Press, Florida 2006.
3. Бредихин А. Н. Электрические контактные соединения / Бредихин А. Н., Хомяков М. В – Энергия, 1980. – 168 с.
4. Оглезнева Светлана Аркадьевна, Ханов Алмаз Муллаянович, Оглезнев Никита Дмитриевич Исследование относительной эрозионной стойкости электродов-инструментов из композиционных порошковых материалов на основе меди // Металлообработка. 2016. №5 (95). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-otnositelnoy-erozionnoy-stoykosti-elektrodov-instrumentov-iz-kompozitsionnyh-poroshkovyh-materialov-na-osnove-medi>
5. Усов В.В. Металловедение электрических контактов. М.: Госэнергоиздат, 1963, 208с.
6. Беляев В.Л. Особенности работы и конструкций многоамперных электрических аппаратов: Учебное пособи. – СПб.: СЗТУ, 2005. – с.
7. Комаров А.А. Электрические контакты: Учебное пособие / Комаров А.А., Яковлев В.Н. – Самара: СамИИТ, 2001. - 51 с.
8. Jian Song. Correlation between Wear Resistance and Lifetime of Electrical Contacts // <https://www.researchgate.net> URL.: <https://www.researchgate.net/publication/258388514> (accessed: 19.05.2020).
9. S. Biyik. Investigation of the Effect of Different Current Loads on the Arc-Erosion Performance of Electrical Contacts // <https://www.przyrbwn.icm.edu.p> URL.: <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/129/a129z4p062.pdf>
10. В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, Д.А. Левыкин. Исследование эрозионной износостойкости электроконтактных материалов в режиме импульсного

- разряда // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин. Тверь: ТГТУ, 2005. С. 112-116.
11. Намитоков К. К. Конспект лекций по технической физике. Электричество и магнетизм: [учеб. пособие] для высш. техн. учеб. заведений / К. К. Намитоков ; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Харьков: ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2017. – 440 с.
 12. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Г.В. Буткевич. – М.: Энергия, 1973. – 263 с.
 13. Федеральный закон от 28.12.2013 N 426-ФЗ (ред. от 30.12.2020) "О специальной оценке условий труда" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2021)
 14. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.04.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.05.2021)
 15. ГОСТ 12.2.033-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.
 16. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
 17. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – М.: Госторгиздат, 2018. – 503 с.
 18. ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).
 19. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Поправкой)
 20. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

21. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы.
22. ГОСТ 12.1.012-2004. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования.
23. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданиях.
24. ГОСТ 12.2.062-81 ССБТ. Оборудование производственное. Ограждения защитные
25. ГОСТ Р 12.1.009-2009. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения.
26. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.
27. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 июля 2013 г. №328н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок» (с изменениями и дополнениями).
28. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.
29. ГОСТ 17.1.3.13-86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений.
30. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания
31. ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности
32. Федеральный закон «О пожарной безопасности» от 21 декабря 1994 г. №69-ФЗ (ред. от от 22.12.2020).
33. О противопожарном режиме (с изменениями на 20 сентября 2019 года). Правительство Российской Федерации. Постановление от 25 апреля 2012 года №390

Приложение А

Electrical discharge resistance of contact elements when switching a high-current electric arc

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM93	Борисова Марьяна Султановна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Герасимов Дмитрий Юрьевич	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Качалов Николай Александрович	к.п.н., доцент		

Introduction

Automatic switches allow not only switching operations but also are devices for protecting electrical circuit elements from overcurrents. The wear of the contact elements of electrical devices leads to an increase in energy losses, heating, and accidents. Data on the causes of fires at industrial and residential sites, provided by the National Association of Rescue and Environmental Organizations, indicate that about 50% of fires in electrical installations are caused by the failure of electrical contacts. Therefore, there is a need to improve their reliability and increase the wear resistance of the contact elements. One of the ways to achieve the assigned tasks is to manufacture contacts from materials most resistant to electrical erosion.

This work aims to study the electrical discharge resistance of contact elements when switching a high-current electric arc. In the course of the study, the following tasks are solved:

1. selection of the parameters of the experimental setup, determination of its advantages and disadvantages;
2. determination of the most wear-resistant material from the test samples;
3. determination of the costs of conducting scientific research;
4. the harmful and dangerous factors to which the personnel are exposed during the study and ways to minimize them, have been identified.

The research results can be further applied in the design of switching devices.

1 Literature review

1.1 Materials of electrical contacts

Electrical contact is the contact of the surfaces of two identical or dissimilar conductors [1,2]. According to the working conditions, they are divided into three types: discontinuous, sliding, fixed. The type of contact is determined by its purpose, the values of the current and contact pressure, the design of the contact unit, and the entire apparatus [6].

Requirements are imposed on the materials from which electrical contacts are made, depending on the physical processes taking place. The reliability and service life of a contact is determined by the material from which the contact is made. Requirements for the materials of contacts are imposed on the basis of their mode of operation. One of the main requirements is: the contact material must have high thermal and electrical conductivity, which leads to a decrease in the amount of heat released after the contact is closed, and an improvement in heat dissipation. It also leads to a decrease in the formation of oxidation processes on the contact surface [5].

Among the noble metals for the manufacture of contacts are used: silver, gold, platinum, palladium, and their alloys (Ag-Au, Au-Pt, Ag-Pd, Pt-Ir, Pt-Ph, Pd-Ir, Au-Ni, Au-Ag -Ni, Au-Pd-Ni). Noble metals, with the exception of silver, are most often used in the form of thin electroplated coatings applied to copper, iron, aluminum, due to their high cost. Such coatings are much harder and more resistant to electrical erosion than other metals. Alloys Ag-Au, Ag-Pd at 50% ratio of components have maximum hardness and minimum erosion.

Copper, its alloys, tungsten, iron, aluminum, brass, etc. are used for the manufacture of medium-loaded contacts. Silver-cadmium and copper-cadmium alloys have increased hardness, high electrical conductivity, and resistance to electrical erosion, uniform wear. Copper-silver alloys have high resistance to welding and electrical erosion. Tungsten contacts have the highest arc resistance; due to their high melting temperature, they are least susceptible to welding and wear.

Highly loaded contacts have the most difficult working conditions. They are used at high currents and voltages and therefore have high contact loads. They are characterized by intense wear, melting, and welding. Refractory metals (W, Mo) and their alloys, or cermet compositions are used. Sintered contacts are made by pressing metal powders with subsequent sintering or impregnation of the pressed refractory base with low-melting components. Compositions based on tungsten or molybdenum powder impregnated with liquid silver or copper are used. Silver and copper provide high electrical and thermal conductivity, resistance to oxidation, and the refractory phase - resistance to wear, electrical erosion, and welding. In addition to double metal compositions, ternary compositions are used: Ag-W-Ni, Cu-W-Ni, as well as cermet materials containing oxides, carbides, or graphite: Ag-CdO, Ag-CuO, Ag-WC, Cu-C, Cu-W, Ag-C, Ag-NiC. Sintered contacts are highly worn and weld resistant under the most severe operating conditions, making them suitable for switches, starters, relays, voltage regulators, high power oil switches, etc. [1]. Figure 1 shows the areas of application of basic metals for electrical contacts, depending on the magnitude of the current [7].

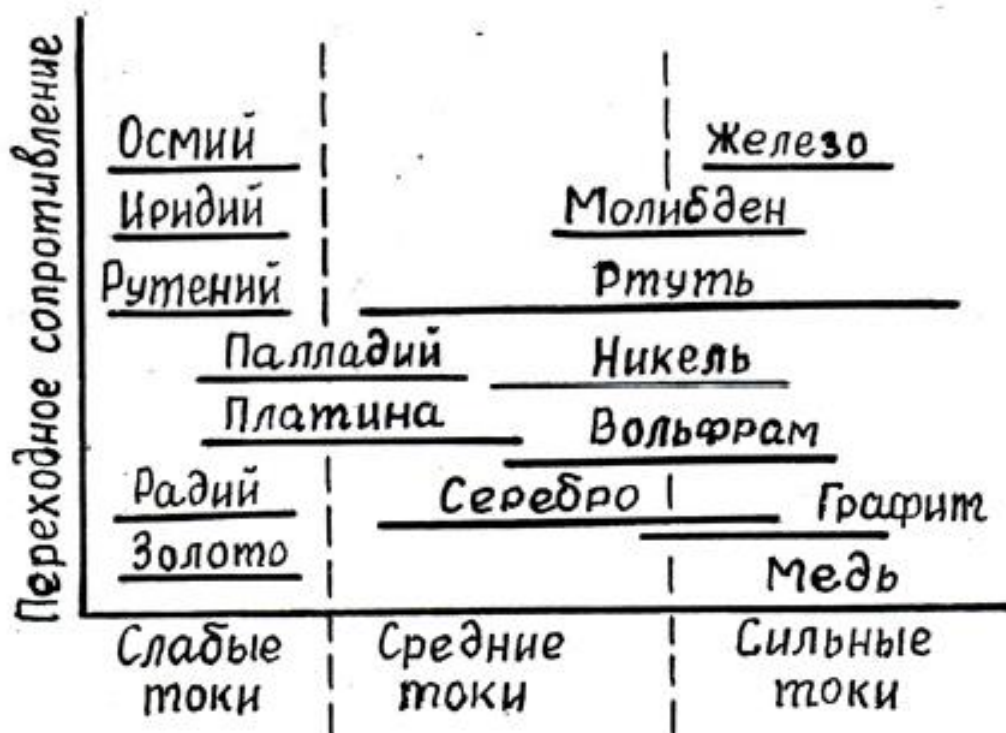


Figure 1. Scope of electrical contact materials

In high-current electrical devices, copper is used as a material for current leads, electrical contacts, and electrodes. The conducted studies of liquid metal contacts allow us to conclude that the most promising for use in high-current switching devices are liquid gallium metal and alloys based on it (gallium-indium-tin). However, gallium is a reactive metal capable of chemically reacting with almost all metals [6].

1.2 Electrical erosion during switching

An electric arc constantly occurs between the contacts of switching devices, causing more or less intense erosion of the contacts, which affects the speed, reliability, and durability of the device. Destruction of an electrode in a discharge can be caused by the “direct” effect of the discharge on the surface of a metal electrically connected to the discharge channel, or by side processes of a “non-electrical” nature, for example, shock waves most intensely excited in powerful pulsed discharges, light radiation from the discharge zone, thermomechanical and thermochemical processes, etc. The erosion process caused by exposure of the electrodes to a high-temperature "cloud" of vapors and gases (plasma) is usually called "plasma" erosion.

With a sufficiently large interelectrode gap, the processes of destruction (erosion) of electrodes are mainly associated with two mechanisms: the bombardment of the anode with fast electrons and the cathode with positive ions. At small interelectrode gaps, other mechanisms of energy transfer from the discharge channel to the electrodes also make a significant contribution. These processes do not necessarily cause "destruction" of the electrode in the sense of mechanical cutting of the material; structural changes, phase transformations, chemical reactions, and other processes can occur on the electrode surface, which ultimately can lead to irreversible changes in the physical properties of the electrodes. For example, a slight disturbance of a thin surface film on an "oxide" cathode can cause a significant change in its emission properties and a change in the operating mode of the corresponding gas-discharge device or device.

Electrical discharge phenomena can be divided into two large classes - contact-erosion ("metal-metal") and non-contact-erosion ("metal-plasma-metal") phenomena. The first class includes those forms of erosion that are observed at the points of contact

with each other of the electrodes of the contacts when a current passes between them. The second class includes all forms of erosion observed in electrical discharges - "gas discharge erosion" (in particular, "plasma" erosion). The phenomena of the first class include, first of all, contact erosion of closing and opening and "electro explosive" erosion.

When the electrodes (contacts of a switching device or electric collector machine) are closed on their surfaces at the points of initial contact, the current density can reach very high values, since due to the inevitable "microroughness" of the surface, the cross-sectional area of the current tubes when the contacts are closed is very small. Therefore, in these places, strong local heating of the metal can occur up to the melting temperature and "explosive" evaporation of the material. The intensity of the contact erosion of the closure depends on the conditions of the closure and the physical properties of the contact materials. If the voltage on the contacts before their closure interrupts the breakdown voltage of the gas gap, then a discharge occurs, and gas-discharge erosion is added to the "proper contact" erosion. When the electrodes are opened (diluted) in the places of "residual" contact, a large amount of heat is released, which leads to the melting of the material. With the further separation of the contacts, the molten mass is drawn out in the form of a liquid "bridge". Depending on the properties of the material and the parameters of the contact system, these bridges can be destroyed "explosively" or by "quiet" evaporation at places of constriction. It is also possible to rupture the bridge without removing material, which leads to its preferential transfer from one electrode to another; this "bridging transfer" often occurs at the contacts of low-voltage equipment. Gas-discharge erosion can be added to this "contact" erosion of opening, as in the case of closing, if the parameters of the electrical circuit allow the occurrence of a discharge between the diverging contacts. The processes of destruction of fuses and, in general, conductors in places of narrowing when strong electric currents flow in them is called "electro explosive" erosion. The course of these processes mainly depends on the rate of supply of electrical energy to the "explosion" zone. After the completion of this "explosive" erosion between the formed electrodes (the remnants of the fuse-link in the case of fuses), a discharge may

occur, and their further destruction is in the form of gas-discharge erosion. Thus, contact erosion in many cases is inextricably linked with non-contact (gas discharge) erosion.

The electroerosive process was also considered as a direct consequence of the individual bombardment of the surface of the electrodes - the cathode with positive ions and the anode - with electrons. As a result of the bombardment, a strong “point” heating of the surface to the material evaporation temperature occurs on the localized areas of the electrodes. Such concepts were especially often used when considering the phenomenon of cathode sputtering in a glow discharge. However, it is difficult to imagine that the entire mass of a metal that fits in an erosion hole and reaches a volume of several millimeters with a powerful single discharge pulse evaporates in discrete portions determined by the impact of single charged particles. Indeed, calculations show that the energy intensity of such a process should be much higher than the actually observed one. In addition, experimental data indicate a significant proportion of liquid metal in erosion products during a pulsed discharge. At the same time, metal evaporation also makes a certain (often predominant) contribution to gas discharge erosion.

1.3 Wear of contacts, methods of reducing wear

As a result of the analysis of the operation of high-current breaking contacts in the structures of switching devices, it can be concluded that to solve the problem of electroerosive wear, only the use of new contact materials is not enough. At the same time, it is necessary to continue the search for methods to reduce the energy release on the contact surfaces during opening [5].

Contact wear is understood as the destruction of the working surface of the switching contacts, leading to a change in their shape, size, weight, and to a decrease in the dip [8].

Electrical wear is associated with the occurrence of electrical discharges (arcs), sparking, melting, evaporation, and transfer of metal from one contact to another. The combination of these phenomena is called erosion. Electrical discharge wear is manifested in a change in the shape of the contacts, the formation of a crater

(depression) on one contact and a needle (protrusion) on the other, which can lead to welding and sintering of the contacts. Figure 2 shows the relative arc resistance of the electrical contact materials, constructed from the results with a short arc of 0.8 mm at a current of 12 kA and a current flow time of 0.0085 s [6].

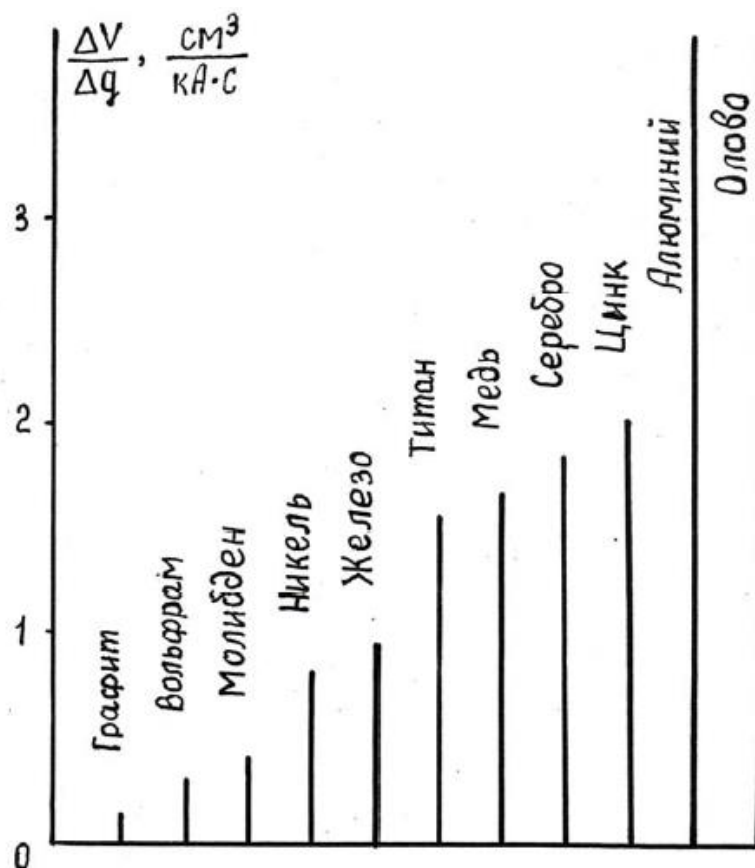


Figure 2. Dependence of the amount of erosion on the amount of electricity

Sintering is the connection of contacts with a metal bridge during the breakdown of the oxide film due to insufficient contact pressures for its destruction.

Chemical wear is corrosive wear resulting from chemical interaction with the environment. Corrosion is accompanied by the formation of nonconducting films on the contact surfaces, which can cause partial or complete disruption of the conductivity of the contacts.

Mechanical wear of contacts from mechanical stress is manifested in their abrasion, deformation, and cracking [1, 4].

In devices designed for numerous switching on and off (switches, contactors, controllers), contact designs with rolling surfaces are used. Such contacts close and open, touching one area of the surface, where an electric arc burns and increased

mechanical wear is observed, and then, during operation, they move relative to each other, and further electrical contact is maintained between clean surfaces. Rolling contacts are wear-resistant because sliding friction is low during operation. When rolling the contact elements, they are self-cleaning from oxide films.

Another method of protecting the contact surface from burning is the use of additional arcing contacts, which are connected in parallel with the main contacts. The main contacts rely on a long-term flow of the operating current, and the arcing contacts - for a lower current, but their contact surfaces are made of refractory material. When switched on, the arcing contacts are closed first, and the electric arc arising from the rebound of these contacts can cause some of their burns. Then the main contacts are turned on, bypassing the arcing contacts.

When disconnected, the main contacts open first, but the circuit remains closed through the arcing contacts, and only after the main contacts are completely disconnected, the arcing contacts begin to open, breaking the electrical circuit. Thus, when the device is turned on and off, an electrical circuit is created and broken by arcing contacts, on which an electric arc arises and burns and oxide films are formed. In all cases, no electric arc occurs between the main contacts, and they touch with clean surfaces.

3 Experimental technique

The maximum amplitude value of the short-circuit current was taken as $I_{sc,max} = 25 \text{ kA}$, based on statistical data on the values of short-circuit currents at industrial enterprises and civil objects of 0.4 kV.

Copper, steel, tungsten, and copper-tungsten alloy of circular cross-section (diameter 6.0 mm), electrode length 30 mm, the distance between the electrode axes 30 mm were used as the electrode material.

When the PCG installation is connected to a power source, the capacitor C is charged with a constant current to the set voltage level. When the contact K is closed (Fig. 3), the accumulated energy is transferred to the load and a high-voltage pulse is generated. The discharge between the electrodes is initiated by an electric explosion of the conductor. Figure 9 shows the oscillogram of the current and voltage of the arc discharge during experiments with copper electrodes (Figure 9).

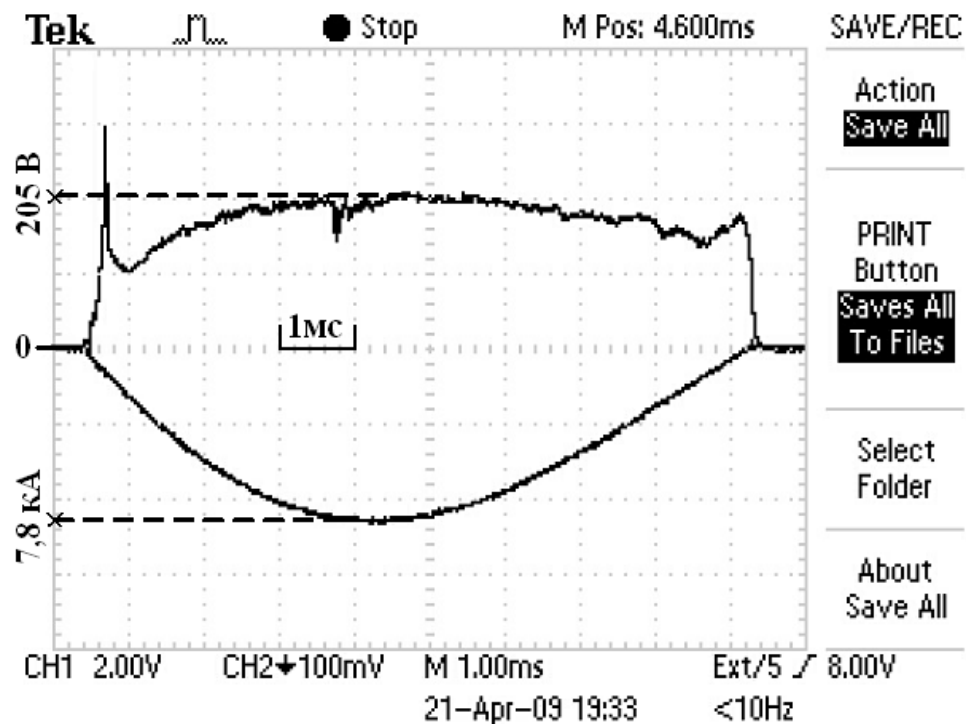


Figure 9. Oscillograms of current and voltage



Figure 10. Copper electrodes after exposure to arc tripping

The photogram shown in Figure 11 shows that the arc discharge is inhomogeneous in structure. It consists of plasma jets with a bright glow in the center, called the core of the plasma stream. The core of the arc arises as a result of the processes of magnetic compression of the arc trunk and heating of plasma flows due to an increase in the current density at the place of the arc. The core is surrounded by plasma with a lower temperature, which has a weaker glow.

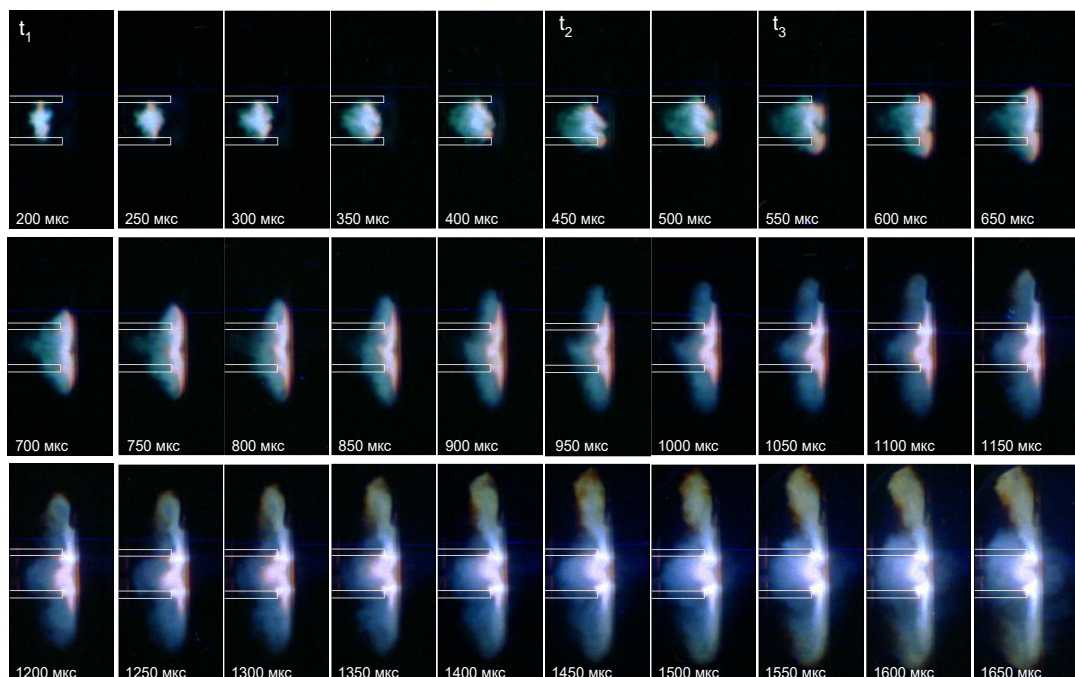


Figure 11. High speed photogram

In turn, high-enthalpy plasma jets act on the surface of the dielectric material, leaving craters on it, which can be seen in Figure 12.

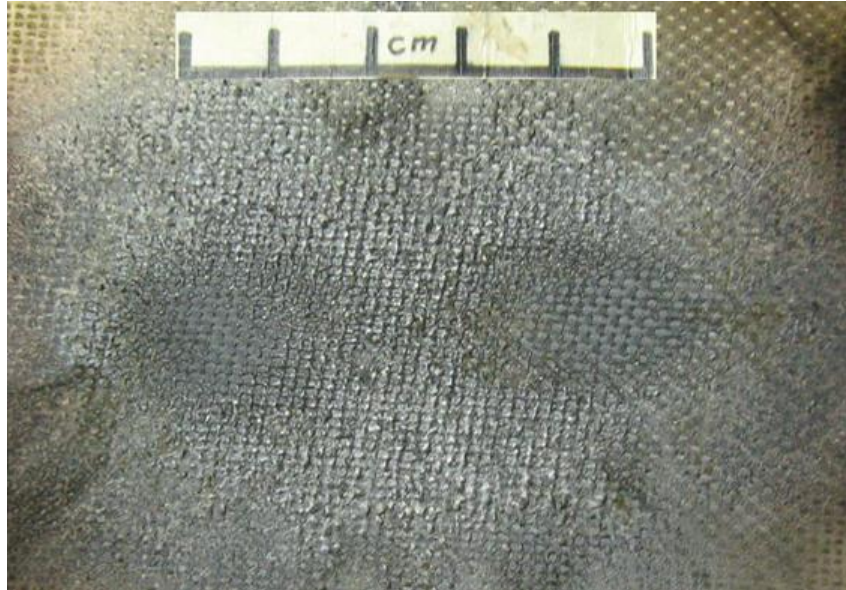


Figure 12. Dielectric material, after exposure to plasma electric arc shutdown

Similar experiments were carried out for contacts made of tungsten, iron, and copper-tungsten alloy. Measurement of erosion was carried out by weighing the electrodes before and after the discharge on an analytical balance. Specific and average specific erosion are determined by the formulas:

$$\bar{G}_a = \frac{\Delta m_a}{W},$$

$$\bar{G}_c = \frac{\Delta m_c}{W},$$

$$\bar{G} = \frac{\Delta m_a + \Delta m_c}{W},$$

$$\bar{G}_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{G}_i,$$

where Δm_a , Δm_c is the ablation of the electrode mass from the anode and cathode, g;

W is the arc energy, kJ;

n is the number of experiments performed.

Experimental and calculated data are shown in Table 1.

Table 1 - Experimental and calculated data

Опыт	U_{arc}, V	I_{arc}, kA	W_{arc}, kJ	$\Delta m_a, g$	$\Delta m_c, g$	$\bar{G}_a, g/kJ$	$\bar{G}_c, g/kJ$	$\bar{G}_{m.a}, g/kJ$	$\bar{G}_{m.c}, g/kJ$	$\bar{G}, g/kJ$	$\bar{G}_m, g/kJ$
CuW											
1	224	7,8	9,4	0,15	0,11	0,016	0,012	0,016	0,012	0,028	0,028
2	218	7,5	8,0			0,019	0,014			0,033	
3	230	7,8	9,9			0,015	0,011			0,026	
4	233	7,7	9,6	0,15	0,11	0,016	0,011			0,027	
5	238	8,1	10,5			0,014	0,010			0,025	
6	241	7,6	9,7			0,015	0,011			0,027	
Cu											
7	261	7,8	11,2	0,46	0,48	0,041	0,043	0,049	0,05	0,084	0,099
8	243	6,7	7,2			0,064	0,067			0,131	
9	282	7,5	9,9			0,046	0,048			0,095	
10	264	7,5	9,7	0,50	0,50	0,052	0,052			0,103	
11	256	6,8	8,1			0,062	0,062			0,123	
12	283	7,8	11,7			0,043	0,043			0,085	
13	252	7,6	10,7	0,47	0,50	0,044	0,047			0,091	
14	261	7,6	10,7			0,044	0,047			0,091	
15	261	7,6	10,9			0,043	0,046			0,089	
W											
16	262	7,8	10,9	0,62	0,24	0,057	0,022	0,05	0,021	0,079	0,071
17	263	7,6	10,7			0,058	0,022			0,080	
18	272	7,8	11,7			0,053	0,021			0,074	
19	271	7,8	11,2	0,58	0,23	0,052	0,021			0,072	
20	271	7,2	9,1			0,064	0,025			0,089	
21	274	7,8	11,8			0,049	0,019			0,069	
22	267	7,8	11,1	0,44	0,24	0,040	0,022			0,061	
23	271	7,9	12,4			0,035	0,019			0,055	
24	273	7,6	11,1			0,040	0,022			0,061	
Fe											
25	242	7,8	10,1	0,11	0,38	0,011	0,038	0,018	0,046	0,049	0,064
26	233	6,8	7,0			0,016	0,054			0,070	
27	241	6,8	7,7			0,014	0,049			0,064	
28	242	7,8	10,3	0,19	0,48	0,018	0,047			0,065	
29	254	7,9	10,5			0,018	0,046			0,064	
30	252	7,6	10,0			0,019	0,048			0,067	
31	242	7,5	10,0	0,23	0,49	0,023	0,049			0,072	
32	242	8,0	11,2			0,021	0,044			0,064	
33	254	7,8	11,5			0,020	0,043			0,063	

Conclusion

In the first section, the reasons for the wear of electrical contacts, contact materials, their advantages, and their application were considered, and the process of electrical erosion was described. The most severe mode of operation of the contacts occurs when the contacts are opened, when an arc occurs, which, due to the high current density and temperature, leads to the destruction of the contacts.

The choice of this or that material is dictated by the requirements for electrical and thermal conductivity, melting point, current and arcing voltage, resistance to erosion and corrosion, resistance to mechanical wear at a relatively low hardness to reduce the required contact pressure.

In the second section, the parameters of the experimental setup were determined and the correctness of its operation was checked.

The third section is devoted to the description of the laboratory test methodology. According to the results of the calculation, it was found that copper-tungsten has the highest resistance to electrical erosion.