

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В
ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»**

На правах рукописи

УДК 622.81



Гладков Александр Юрьевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОСВЕЩЕНИЯ В ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

Специальность 05.26.01 - Охрана труда (по отраслям) (технические науки)

Диссертация

на соискание степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р техн. наук, доцент

Бершадский Илья Адольфович

Идентичность всех экземпляров
диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.008.01



И.А. Бершадский

Макеевка – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ.....	13
1.1 Оценка способов обеспечения взрывобезопасности систем освещения.....	13
1.2 Анализ методов и способов оценки искробезопасности рудничного взрывозащищенного электрооборудования.....	23
1.3 Характеристика искробезопасных источников питания систем освещения.....	30
1.4 Постановка задач исследования.....	39
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОЦЕНКИ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ РАЗРЯДОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЗАМЫКАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТОЙ.....	41
2.1 Оценка влияния полярности напряжения, прикладываемое к контактной паре вольфрам-кадмий на параметры разряда	41
2.2 Разработка уточненной компьютерной модели для оценки искробезопасности индуктивно-емкостных цепей.....	56
2.3 Определение минимально воспламеняющих параметров разряда индуктивно-емкостной цепи рудничного взрывозащищенного электрооборудования.....	64
2.4 Обоснование методики бескамерной оценки искробезопасности сложных индуктивно-емкостных цепей.....	73
2.5 Выводы	75
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОЦЕНКИ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ РАЗРЯДОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАЗМЫКАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТОЙ.....	76
3.1 Разработка уточненной компьютерной модели для оценки искробезопасности индуктивно-резистивных цепей.....	76

3.2 Экспериментальное определение динамики тепловой постоянной инерции на протяжении всего дугового разряда.....	84
3.3 Тестирование компьютерной модели для оценки искробезопасности индуктивно-резистивных цепей.....	90
3.4 Обоснование методики бескамерной оценки искробезопасности сложных индуктивно-резистивных цепей.....	93
3.5 Выводы.....	95
ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ.....	96
4.1 Обоснование технических характеристик шахтного освещения с учетом предельных параметров искробезопасности.....	96
4.2 Разработка схемы источника питания с динамической защитой системы освещения КУОШ.....	115
4.3 Использование результатов работы.....	132
4.4 Выводы.....	137
Общие выводы.....	139
Список литературы.....	142
Приложение А Разряды замыкания апериодической RC цепи.....	156
Приложение Б Разряды замыкания омической цепи напряжением 30 В и полярностью вольфрам – анод	174
Приложение В Определение коэффициентов регрессии зависимости минимальной воспламеняющей энергии от напряжения и длительности емкостной цепи для смесей группы I.....	177
Приложение Г Определение коэффициентов регрессии зависимости искробезопасного тока от времени срабатывания источника питания, индуктивности и напряжения цепи	183
Приложение Д Копии документов о внедрении результатов исследований....	185

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Статистика травматизма в подземных выработках шахт Донбасса с 2007 по 2017 года показывает, что ежегодно происходит в среднем 210 несчастных случаев. Большая их часть (68,6%) связана с тремя опасными производственными факторами: обвалы и обрушения, транспорт, электрические машины и механизмы. В условиях отсутствия светильников, питаемых от электрической сети, произошло 37,6 % несчастных случаев в очистных и 17,7% в подготовительных забоях, оснащенных механизированными комплексами и агрегатами.

Стационарное осветительное оборудование в подземных выработках с наличием взрывоопасной метано-пылевоздушной среды (группы I), характеризуется высокими массогабаритными показателями из-за щелевой защиты и имеет уровень взрывозащиты не выше высокого (РВ). Это не позволяет его размещать по габаритным показателям в секциях механизированных крепей при отработке тонких пластов, составляющих 86,9%, а также ограничивает их применение в очистных и подготовительных выработках пластов крутого падения, в выработках с исходящей струей воздуха из-за недостаточного уровня взрывозащиты (должен быть не ниже РО).

Основной мерой обеспечения пожаро- и электробезопасности искроопасной осветительной сети 127 В или 220 В (50 Гц) данного оборудования остается защита от токов короткого замыкания, утечки с непрерывным контролем целостности заземления светильников. Последнее практически не реализуемо в передвижных комплексах очистных и подготовительных выработок, т.к. контроль целостности сводится к визуальному осмотру в условиях критического ограничения времени простоя оборудования.

Существенно расширить область применения осветительного оборудования за счет устранения выявленных недостатков возможно только за счёт внедрения искробезопасных систем освещения. Несмотря на очевидные преимущества

искробезопасного освещения, реализация его в протяженных выработках сопряжена с рядом нерешенных технических задач, и сводит на нет применение стационарного освещения, особенно в лавах тонких пластов. Одной из таких задач является создание искробезопасного источника повышенной мощности с параметрами, учитывающими влияние кабельной линии в отношении накопленной энергии, а также снижение амплитуды и запаздывания сигнала о моменте начала аварийного разряда.

Работа выполнена по одному из основных научных направлений МАКНИИ в рамках научно исследовательских работ 0118D000086 «Провести исследования и разработать технические требования к устройству защиты от короткого замыкания нового поколения», Н-22-17 «Развитие методов оценки и обеспечения пожаробезопасности электрифицированных помещений, искро- и электробезопасности шахтных электрических сетей».

Степень разработанности темы

В настоящее время уже реализованы технические устройства локального освещения рабочих мест на базе источников питания с выходной искробезопасной мощностью 72 Вт и светодиодных малогабаритных светильников. Они не обеспечивают выходные искробезопасные параметры с кабельной линией более 20...50 м при соблюдении норм освещенности. Искробезопасные системы освещения очистных выработок, отличающихся отсутствием в них искроопасной сети питания 127 В/220В, в странах СНГ и за рубежом, еще не применяются. Разработка таких систем невозможна без высокоэффективных светодиодных источников света и источников питания с искробезопасной мощностью, превышающей достигнутый уровень не менее чем в 2 раза, т.е. от 150 Вт и напряжением от 30 В. Это обусловлено необходимостью компенсации падения напряжения на всем протяжении кабельной линии.

Для достижения требуемой мощности в источниках питания целесообразно применять способ опережающего отключения (динамическую защиту). И учитывать влияние параметров кабельной линии, которое проявляется не только в виде накопленной энергии, но и в виде снижения амплитуды, запаздывания

сигнала момента начала аварийного разряда, чем снижается точность контроля и, следовательно, эффективность всей искрозащиты.

Процесс разработки искробезопасных систем освещения значительно упрощается при использовании достоверных расчётных методов оценки искробезопасности, позволяющих системно выбирать безопасные параметры источников питания повышенной мощности.

Существующие экспериментальные и расчётные методы оценки искробезопасности не обладают приемлемой для практики точностью от 11,5%, что приводит к существенному занижению нормируемого значения коэффициента запаса или ограничены в применении к данным источникам питания, характерной особенностью которых является высокое быстродействие. Низкая достоверность расчётных методов обусловлена недостаточной изученностью процессов выделения энергии электрической цепью с малой длительностью (динамическая защита) в разряд и условий поджигания им взрывоопасной смеси в зависимости от параметров разряда (тепловой постоянной инерции, постоянной времени и установившегося напряжения на разряде, полярности напряжения, прикладываемого к контактной паре).

Таким образом, является весьма актуальной научно-техническая задача разработки и обоснования безопасных параметров электрических цепей освещения в очистных выработках на основе создания достоверных методов оценки искробезопасности сложных электрических цепей.

Решением проблемы разработки способов и средств обеспечения искробезопасности источников повышенной мощности занимались ученые: Ерыгин А.Т., Ковалёв П. Ф., Кравченко В.С., Красик Я.Л., Давыдов В. В, Диденко В.П., Кириченко Б.М., Марсюк Н. А., Погорельский А.Е. и др

Существенный вклад в разработку и развитие методов оценки искробезопасных цепей внесли ученые: Кравченко В.С., Петренко Б.А., Ерыгин А.Т., Трембицкий А.Л., Бершадский И.А., Иохельсон З.М., Коган Э.Г., Толчёнкин Р. Ю. и др.

Тем не менее, не получили достаточного развития достоверные методы оценки искробезопасности сложных электрических цепей с малой длительностью разряда и средства их обеспечения, что является препятствием создания искробезопасного освещения в очистных выработках.

Цель и задачи исследования

Обеспечение безопасной эксплуатации искробезопасных цепей систем освещения очистных выработок путем раскрытия закономерностей процессов выделения электрической цепью энергии в разряд и условий поджигания им взрывчатой смеси в зависимости от его параметров, что обеспечит повышение безопасности труда в угольных шахтах, опасных по газу и пыли.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ способов обеспечения взрывобезопасности, характеристик искробезопасных источников систем освещения, а также уровня методов оценки, разработки и сертификации искробезопасных цепей.

2. Выполнить исследования процесса дугового разряда, возникающего при замыкании индуктивно-ёмкостных цепей и установить влияние полярности, напряжения, прикладываемого к контактной паре вольфрам-кадмий на параметры разряда (значения установившегося анодно-катодного напряжения, его постоянной времени и выделяемой энергии).

3. Разработать математические модели разрядов, возникающих при замыкании индуктивно-ёмкостных цепей и при размыкании индуктивно-резистивных цепей сложной конфигурации, позволяющие производить расчёт энергии, выделяемой в разряд и его длительности.

4. Установить зависимости для расчёта минимальной воспламеняющей энергии разряда, возникающего при замыкании ёмкостных цепей напряжением от 20 до 300 В и длительности разряда.

5. Развить расчётный метод «бескамерной тепловой оценки» искробезопасности электрических цепей, который повысит достоверность при оценке источников питания с динамической защитой.

6. Установить зависимости для расчёта допустимого искробезопасного тока

источников питания с динамической защитой и индуктивно-резистивной нагрузкой от напряжения цепи в диапазоне 30...90 В, ее индуктивности в пределах 30...5000 мкГн и времени срабатывания источника 1...15 мкс.

7. Обосновать параметры безопасности и разработать электрическую схему источника питания с повышенной искробезопасной мощностью.

Объект исследования – процессы выделения электрической цепью сложной конфигурации энергии в разряд с учетом влияния параметров искрообразующего механизма; воспламенение и предотвращение воспламенения взрывоопасной газовой смеси электрическими разрядами различной энергии и продолжительности; искрозащитные электронные элементы, которые обеспечивают искробезопасность цепи при коммутациях и перегрузках.

Предмет исследования – влияние параметров разряда, режимов коммутации электрических цепей на воспламеняющую способность газозвушной взрывоопасной смеси и прогнозирование уровня опасности электрического искрения цепей искробезопасного освещения в очистных выработках.

Научная новизна

1. Впервые получена зависимость изменения сопротивления и тепловой постоянной инерции дугового разряда τ в индуктивно-резистивных цепях, отличающаяся тем, что в ней учитываются мгновенные значения средней мощности разряда и статическая вольтамперная характеристика дуги, кроме того, показано, что τ возрастает за время существования разряда в 1,4 раза (от 0,65 мкс до 0,9 мкс), что позволило уточнить модель разряда указанных цепей и повысить достоверность оценки искробезопасности для источников питания с динамической защитой не менее, чем в 3 раза.

2. Усовершенствован метод определения минимальной воспламеняющей энергии, выделяемой в разряд при замыкании ёмкостной цепи постоянного тока, отличающийся тем, что в нём используются предложенные регрессионные уравнения нелинейного логарифмически-степенного характера, позволяющие определить граничные условия поджигания метановоздушной смеси во всем

диапазоне длительности разряда от 0,1 мкс до 14 мс и напряжения цепи от 20 до 300 В, при этом не прибегая к аппроксимации по 3-м ближайшим напряжениям с фиксированной длительностью разряда.

3. Впервые, с использованием оптимального тока обрыва дуги, при котором энергия разряда максимальна, установлены зависимости допустимого искробезопасного тока источников питания от времени срабатывания их динамической защиты (от 1 до 15 мкс), выходного напряжения (от 30 до 90 В), индуктивности (от 30 мкГн до 5 мГн) и активного сопротивления кабельной линии с нагрузкой, что нашло своё выражение в формализации установленных связей при создании искробезопасных систем освещения протяженных выработок; в частности, уточнены количественные параметры и требуемые технические характеристики средств освещения очистных горных выработок в соотношении с их протяжённостью.

4. Впервые установлено, что изменение напряжения разряда в ёмкостных цепях носит экспоненциальный характер при неизменности постоянной времени экспоненты и установившегося значения напряжения в условиях совокупности воздействия влияющих факторов, соответствующих параметрам эксплуатации шахтных осветительных сетей, в частности в диапазоне первоначального напряжения заряда конденсатора от 30 до 70 В математическое ожидание постоянной времени составляет 29 нс, установившееся значение напряжения – 9В, а значение энергии, выделяемой в разряд больше в 1,2 раза при полярности приложенного напряжения к контактной паре вольфрам – анод, кадмий – катод. Это позволило уточнить компьютерную модель разряда указанных цепей и повысить достоверность оценки искробезопасности для источников питания с динамической защитой не менее, чем в 4,2 раза.

Теоретическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в усовершенствовании математических моделей процессов выделения энергии в разряд, уточнении зависимостей для определения минимальной воспламеняющей энергии разряда в ёмкостных цепях, установлении зависимостей расчёта допустимого

искробезопасного тока источников питания с динамической защитой и индуктивно-резистивной нагрузкой, что позволяет расчетным путем определить граничные параметры искробезопасных электрических цепей освещения в очистных выработках и повысить безопасность труда горнорабочих.

Практическая значимость работы:

- разработана и утверждена методика «Расчётная оценка искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока», 2019 г. (ГОУ ВПО «ДОННТУ» и ГУ «МАКНИИ»). Данная методика используется в Испытательных центрах ГУ «МАКНИИ», ГУ «НИИВЭ», в проектно-конструкторских институтах ГУ «Автоматгомаш им. В.А. Антипова», ГУ «Донуглемаш».

- результаты работы вошли в Техническое задание на изготовление искробезопасной системы освещения протяжных выработок шахт; впервые создан опытный образец КУОШ (ЧАО «НПП «МЗША», г. Макеевка).

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались: теоретические основы электротехники и электроники, математического моделирования, методы теории решения изобретательских задач для синтеза схмотехнических решений средств обеспечения искробезопасности электрических цепей, активных физических экспериментов с планированием их в направлении выявления закономерностей и количественных соотношений между параметрами разряда и электрической цепи, лабораторных испытаний для проверки безопасных свойств разработанных средств обеспечения искробезопасности.

Положения, выносимые на защиту

1. Динамические и статические характеристики дуговых разрядов при замыкании индуктивно-емкостных и размыкании индуктивно-резистивных цепей, в которых учитывается изменение сопротивления и тепловой постоянной инерции дугового разряда, позволяющие на основе математического моделирования повысить достоверность определения граничных воспламеняющих параметров электрических цепей с малой длительностью разряда.

2. Аналитические зависимости минимальной воспламеняющей энергии, выделяемой в разряд при замыкании емкостных цепей от напряжения и длительности разряда, являющиеся основой расчетного метода оценки искробезопасности названных электрических цепей, что позволяет уточнить условия поджигания разрядом взрывоопасной смеси и одновременно обеспечивает повышение безопасности труда в угольных шахтах, опасных по газу или пыли.

3. Научно-обоснованный метод определения допустимого искробезопасного тока источника питания, в котором учитывается время срабатывания и выходное напряжение динамической защиты, индуктивность и омическое сопротивление кабельной линии с распределенной нагрузкой, позволяющий определить предельные искробезопасные электрические параметры цепей освещения в очистных выработках.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается обоснованностью принятых допущений, использованием апробированных методов теории электрических цепей, математического анализа и моделирования, достаточным объемом исходных экспериментальных данных, современных методов статистической обработки результатов наблюдений, а также приемлемой сходимостью результатов моделирования и эксперимента, положительными результатами лабораторных испытаний разработанных схемотехнических решений источника питания с динамической защитой для системы освещения.

Усовершенствованный метод бескамерной оценки искробезопасности на основе уточненных математических моделей разряда обеспечивает погрешность не более 5% при оценке источников питания с динамической защитой.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на международной научно-технической конференции «Завалишинские чтения - 2016», г. Санкт-Петербург (2016 г.), III международной научно-практической конференции «Инновационные

перспективы Донбасса», г. Донецк (2017 г.), IX Евразийском научном форуме «Интеграция науки и образования как основа эволюции Евразийского экономического союза», г. Санкт-Петербург (2017 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 15 научных работах: 7 - в специальных научных журналах и сборниках, 3 - в докладах и тезисах конференций, 1 нормативная методика, 4 патента Украины на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов с выводами по каждому разделу, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Она изложена на 196 страницах сквозной нумерации, в том числе включает 56 рисунков, 27 таблиц, список использованных источников из 112 наименований на 14 страницах и 5 приложений на 40 страницах.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ
ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ

1.1 Оценка способов обеспечения взрывобезопасности систем освещения

Одним из условий высокопроизводительного безопасного труда в угольных шахтах является хорошая освещенность рабочего пространства. Но в подземных выработках естественное освещение вообще отсутствует. Применение правильно выбранного искусственного освещения позволяет обеспечить запланированный технологический процесс ведения горных работ, повышает производительность труда, способствует предупреждению травматизма подземных горнорабочих и своевременному выявлению опасных производственных факторов, включая механические повреждения оборудования [1].

Особое значение достаточная освещенность приобретает при риске обвала породы или при работе с механизированными комплексами - при недостатке света можно упустить из виду рискованную ситуацию, которую в принципе можно исправить, если вмешаться в ход событий вовремя [2, 3].

Применение стационарных осветительных установок в угольных шахтах отражено в нормативных документах [4, 5, 6, 7] в виде обязательных требований в части мест их установки, норм и плоскости освещенности. Нормы освещенности основных мест установки осветительных установок приведены в Таблице 1.1.

При этом должен учитываться один из основных принципов снижения риска взрыва в угольных шахтах, опасных по газу и/или пыли - предотвращение появления активных источников воспламенения [8]. В соответствии с нормативными документами [9, 10, 11] реализация данного принципа заключается в применении во взрывоопасных условиях только взрывозащищенного электрооборудования, т.е. взрывозащищенных систем освещения.

Таблица 1.1 – Регламентируемые нормы освещенности в основных подземных горных выработках угольных шахт

Участок выработки	Плоскость, в которой нормируется освещенность	Минимальная освещенность, лк
Проходческие подвесные полки	Горизонтальная на полке	2-5
Очистные выработки с механизированными комплексами	Вертикальная на груди забоя и горизонтальная на почве	2-5
Уклоны и бремсберги для транспортировки грузов, выработки для перевозки людей механизированными транспортными средствами	Горизонтальная на почве	1
Призабойное пространство подготовительных выработок, проводимых с применением проходческих комплексов или комбайнов	Вертикальные на забое Горизонтальная на почве	5 2
Откаточные штреки и квершлагги, разминовки на вспомогательных выработках, заезды, камеры ожидания, пункты посадки и выхода людей из поездов	Горизонтальная на почве	2
Разминовки в пределах околоствольных дворов, приемные площадки уклонов и бремсбергов, электромашинные установки, передвижные подстанции и распределители вне специальных камер	Горизонтальная на почве	5

Взрывозащищенное оборудование в зависимости от опасности стать источником воспламенения и условий его применения во взрывоопасных средах классифицируется по уровням взрывозащиты (таблица 1.2).

Таблица 1.2 –Характеристика уровней взрывозащиты

Уровень взрывозащиты	Обозначение			Характеристика	Примечание
	[9]	[11]	[12]		
Повышенный	РП	Мс	-	Взрывозащита обеспечивается только в признанном нормальном режиме его работы	Электрооборудование обесточивается при возникновении взрывоопасной среды
Высокий	РВ	Мб	М2	Взрывозащита обеспечивается как при нормальном режиме работы, так и при одном признанном вероятном повреждении, определяемым условиями эксплуатации, кроме повреждений средств защиты	Электрооборудование обесточивается при возникновении взрывоопасной среды
Очень высокий	РО	Ма	М1	По отношению к высокому уровню приняты дополнительные средства взрывозащиты, предусмотренные стандартами на виды взрывозащиты	Электрооборудование продолжает работу даже в присутствии выброса газавзрывоопасной концентрации

Существует несколько способов обеспечения взрывозащиты (исполнений взрывозащищенного оборудования) для достижения их требуемого уровня. Их можно разделить на 4 основные группы [13]:

- а) снижение вероятности возникновения электрической искры;
- б) изоляция электрических цепей от взрывоопасной смеси;
- в) сдерживание взрыва;
- г) ограничение мощности искры.

Снижение вероятности возникновения электрической искры (а) основано на дополнительных конструктивных мерах против возможного превышения допустимой температуры и возникновения дуговых разрядов только при нормальной работе оборудования (взрывозащита вида «е»). Основным недостатком данного способа является его узкая область реализации – взрывозащищенное электрооборудование, применяемое в шахтах неопасных по газу, но опасных по взрыву угольной пыли. Это вызвано тем, что способ не предотвращает появление активных источников воспламенения, обусловленных дуговыми разрядами, при признанных вероятных повреждениях, определяемых условиями эксплуатации изделия.

Способ (б) подразумевает заключение искроопасных электрических цепей в специальные оболочки, заполненные газообразным (газ под избыточным давлением вида «р»), жидкостным (масляное заполнение вида «о») или твердым диэлектриком (кварцевое заполнение вида «q» или заливка компаундом «т») так, чтобы взрывоопасная смесь не находилась в контакте с данными цепями. Учитывая особенности осветительных установок – наличие источника света со значительными тепловыделениями, светопропускающих элементов, реализация данного способа в светильниках весьма затруднительна. О чем свидетельствует отсутствие практического внедрения данного способа в шахтных стационарных светильниках, изготавливаемых в настоящее время в странах СНГ и в Европе.

Способ (в), основанный на сдерживании взрыва (взрывонепроницаемая оболочка вида «d») подразумевает, что все искроопасные электрические цепи и нагретые элементы заключены в специальную прочную оболочку, внутренняя

полость которой соединяется с внешней взрывоопасной атмосферой через взрывонепроницаемые щели между фланцами. При этом не исключается контакт электрических цепей с взрывоопасной смесью внутри оболочки и возможность ее воспламенения, но при этом гарантируется, что оболочка сдерживает возникшее в результате взрыва избыточное давление, т.е. вспышка не выходит за пределы ограничений взрывонепроницаемой оболочки.

Способ (г), основанный на принципе ограничения мощности искры (искробезопасная электрическая цепь «i»), создает такие условия, что электрический разряд в цепи и нагретые элементы оборудования не могут воспламенить взрывчатую среду при нормальной работе и с учетом учитываемых повреждений элементов оборудования [14]. Данный вид взрывозащиты обеспечивает меньший вес и габариты, более простую технологию изготовления и соответственно меньшую стоимость. Он характеризуется самой высокой степенью безопасности [15], что дает возможность не обесточивать искробезопасное оборудование во взрывоопасной атмосфере, т.е. реализовать в светильниках аварийное (бесперебойное) освещение выработки.

В настоящее время весь парк шахтного стационарного осветительного оборудования, применяемого в шахтах ДНР и большая его часть – в РФ, не имеет осветительных приборов, уровень взрывозащиты которых выше высокого (РВ). В частности представителями такого рода светильников являются: Ватра ЛСР-01-16-033 (рисунок 1.1), Украина, СЗВ, РФ (рисунок 1.2).

Безопасность применения данного уровня взрывозащиты и ниже (таблица 1.2) основывается на обязательном применении автоматической газовой защиты, отключающей от сети все электрооборудование, включая осветительное, при достижении нижнего концентрационного предела метана. В данной аварийной ситуации могут быть допущены к эксплуатации только светильники, имеющие очень высокий (РО) уровень взрывозащиты и питающиеся от бесперебойных источников, независимых от сети 127 В, 220 В, 50 Гц или от автономных аккумуляторных искробезопасных источников.



Рисунок 1.1 - Светильник рудничный взрывобезопасный светодиодный
Ватра ЛСР-01-16-033. Внешний вид



Рисунок 1.2 - Светильник шахтный стационарный СЗВ. Внешний вид

Все привыкли к парадоксальному режиму «работы освещения» в аварийной ситуации – освещение в чрезвычайной обстановке должно быть отключено и выключается, чтобы не создавать дополнительной угрозы, вместо того, чтобы освещение облегчало работу по спасению людей или еще лучше обозначало им пути безопасного выхода из аварийной зоны.

Таким образом, высокий уровень взрывозащиты (РВ) осветительного оборудования не только не позволяет реализовать аварийное освещение на их базе, но и ограничивает их применение на горнодобывающих предприятиях, где не допускается применение электрооборудования с уровнем взрывозащиты ниже очень высокого (РО). Например, в очистных и подготовительных выработках пластов крутого падения, опасных по газодинамическим явлениям, а также в выработках с исходящей струей воздуха.

Стоит отметить особые условия организации осветительной сети с высоким (РВ) уровнем взрывозащиты, имеющей широкое внедрение в настоящее время. Светильники выполнены с применением щелевой защитой «d», которая диктует избыточные массогабаритные показатели и высокую стоимость, а, следовательно, ограничение применения в условиях стесненного рабочего пространства очистных и подготовительных выработок [16]. Питание светильников осуществляется от сети 127 В или 220 В, 50Гц специализированных источников питания шахтных по бронированному или гибкому экранированному силовому кабелю. Сеть должна иметь защиту от короткого замыкания и от токов утечки. Кабель имеет жилу заземления, что обеспечивает контроль токов от утечки и подключение светильника к общешахтному контуру заземления. Непрерывный контроль целостности заземления светильников, влияющий, в том числе на работоспособность защиты от токов утечки проводится только визуальным осмотром, т.к. автоматический непрерывный контроль в источниках питания шахтных не предусмотрен. Данный способ контроля практически не осуществим в условиях подготовительных или очистных выработок из-за ограниченного времени простоя добычного оборудования.

В описанных условиях светильники гарантированно не обеспечивают безопасность их эксплуатации, регламентируемой требованиями по нормам защиты от поражения электрическим током и являются источником возникновения пожаров или поражения людей электрическим током [17].

Основным препятствием на пути создания светильников с высоким уровнем взрывозащиты (РО) была невозможность генерации интенсивного излучения

маломощными, низкотемпературными и низковольтными источниками света. За последние годы были разработаны высокоэффективные низкотемпературные излучатели на базе светоизлучающих диодов (LED). Такие твердотельные излучатели имеют хорошие светотехнические характеристики при уровне мощности, позволяющем обеспечить искробезопасные параметры. Отсутствие высокотемпературного источника света при условии обеспечения вида «i» не требует применять для светильника корпусную взрывозащиту.

Данное направление усовершенствования стационарных осветительных систем является на сегодняшний день самым перспективным, поскольку его реализация резко снижает вероятность появления активных источников воспламенения и открывает возможность реализации в светильниках аварийного (бесперебойного) освещения. Благодаря чему интенсивно внедряется в современных системах освещения в виде комбинированных способов обеспечения взрывобезопасности: выходные электрические цепи источника питания таких систем искробезопасны, а цепи до искрозащитных элементов защищены другим видом взрывозащиты, зачастую щелевой защитой «d» и также обесточиваются в случае достижения нижнего концентрационного предела автоматически. Наиболее значимыми в части достигнутого технического уровня представителями такого рода систем освещения являются, например, устройство освещения горных машин типа УОГМ (рисунок 1.3), Украина, комплекс освещения очистного забоя КООЗ, Украина (рисунок 1.4).



Рисунок 1.3 - Устройство освещения горных машин типа УОГМ. Внешний вид

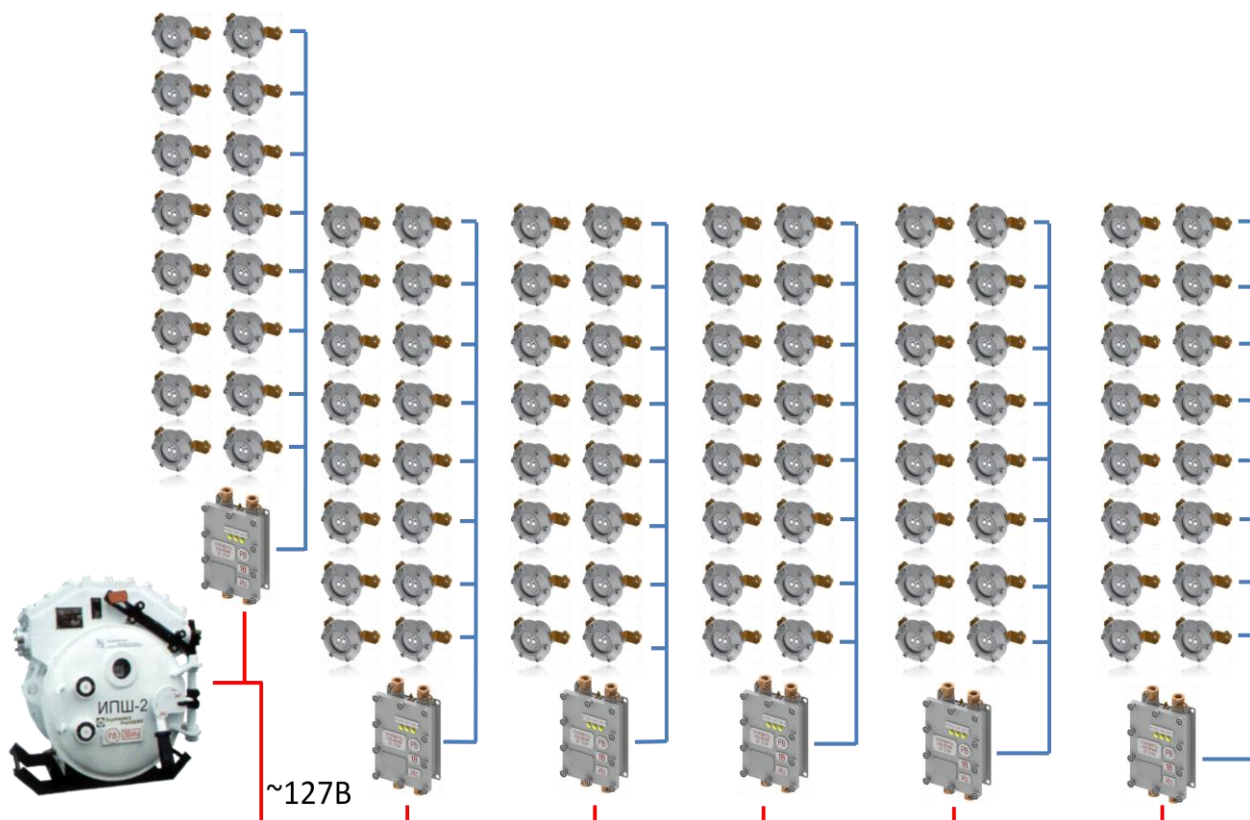


Рисунок 1.4 - Комплекс освещения очистного забоя КООЗ. Внешний вид

Источники питания устройства УОГМ устанавливаются в оболочке электроблока комбайна с щелевой защитой «d», а их выходные цепи обеспечивают искробезопасное исполнение светильников и фары, что определяет возможность их крепления на комбайне без дополнительных корпусных взрывозащит.

Источники питания комплекса освещения очистного забоя конструктивно выполнены в оболочке с щелевой защитой «d» и выходными цепями «i», обеспечивающими светильникам искробезопасное исполнение. За счет сравнительно высокой искробезопасной мощности источников питания (2 канала по 72 Вт) их количество снижено до 6 при обеспечении норм освещенности для очистного забоя. Таким образом, благодаря достигнутому низкому массогабаритным показателям светильников и минимального количества источников питания, составные части комплекса успешно вписываются в условия стесненного рабочего пространства очистных выработок. И позволяют одним

комплексом осветить до 50 м забоя, более 100 м выработок для перевозки людей механизированными транспортными средствами с возможностью аварийного (бесперебойного) освещения. Но при этом не устраняют риск взрыва полностью за счет наличия в очистном забое искроопасных цепей питания источников.

Анализ зарубежного опыта показал незначительную актуальность повышения безопасности шахт за счет применения искробезопасных систем освещения очистных и подготовительных выработок. Это связано с тем, что в Англии, Германии, Польше преимущественно применяется струговая выемка угля в полностью автоматизированном режиме. На шахтах горнякам запрещено находиться в забое во время работы струга. Поскольку организация осветительной сети построена на применении светильников с высоким (РВ) уровнем взрывозащиты, питаемых от искроопасной обособленной линии 110 В переменного тока, во время работы струга светильники обесточены [18].

Анализ направлений в обеспечении безопасности применения электрической энергии в шахтах показал, что перспективным, на сегодняшний день, является внедрение в электрических устройствах освещения вида взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь «i»» [19, 20, 21]. Поскольку им полностью устраняются условия воспламенения окружающей среды, поражения людей электрическим током, а также недостатки вышеизложенных способов обеспечения взрывобезопасности и открывается возможность реализации в светильниках аварийного (бесперебойного) освещения.

До настоящего времени искробезопасная система освещения протяженных выработок (без искроопасных цепей во взрывоопасной зоне забоя) в странах СНГ не разработана и не внедрена. Реализация, которой требует разработки искробезопасных источников повышенной мощности от 150 Вт, методики определения его оптимальных параметров (напряжения, тока, мощности) с учетом падений напряжений на кабеле.

1.2 Анализ методов и способов оценки искробезопасности

Как правило, искробезопасные системы освещения построены на базе источников питания, с нелинейной вольтамперной характеристикой. Они представляют собой совокупность сложных последовательно - параллельных соединений, состоящих как из линейных элементов (резисторов, конденсаторов, дросселей), так и нелинейных (управляемых полупроводниковых элементов, например, транзисторов, тиристоров и т.д.). На стадии разработки и при испытаниях подобных систем неоднократно возникает необходимость оценки их искробезопасности, т.е. обоснования реализованных параметров источника питания, кабельной линии и нагрузки (светильников).

На данный момент общепризнанным методом оценки (обоснования параметров) искробезопасности является метод экспериментальных испытаний с помощью взрывных камер [22], который применяется как основной в ДНР, РФ и странах Европы [23, 24]. Испытания проводят при повышенном в 1,5 или 2 раза (коэффициент искробезопасности в зависимости от используемого искрообразующего механизма) токе индуктивных и омических цепей или напряжения емкостных цепей в представительных газовых смесях. То есть тех, в которых оборудование в дальнейшем эксплуатируется. Для рудничного электрооборудования представительной смесью является метановоздушная.

При испытаниях проводят 16000 искрений оцениваемой цепи с максимально допустимым количеством взрывов не более одного на 1000 искрений, т. е. вероятность возникновения взрывов в камере не должна превышать 10^{-3} .

Международная электротехническая комиссия (МЭК) рекомендует в качестве унифицированного испытательного устройства искрообразующий механизм I типа. Он состоит из кадмиевого диска с двумя пазами (первый электрод) и четырех вольфрамовых проволок диаметром 0,2 мм, закрепленными в держателе. Держатель и диск вращаются в противоположных

направлениях, обеспечивая периодическое замыкание и размыкание контролируемой цепи.

Искрообразующий механизм МЭК предназначен для испытания омических, индуктивных и емкостных цепей с индуктивностью не более 1 Гн, напряжением не более 300 В и током через его контакты не более 3 А. При токах более 3 А используется искрообразующий механизм прерывистого контакта II типа (при токах до 5 А), состоящий из вращающегося со скоростью 40-60 об/мин диска с радиально посаженными на него десятью оцинкованными проволочками диаметром 0,4 мм, которые в процессе движения скользят по неподвижно закрепленной пиле толщиной 0,25-0,3 мм с высотой зуба 0,4-0,5 мм. Провода расположены таким образом, что одновременный контакт более одного провода с пилой исключен. При токах более 5 А используется искрообразующий механизм с разрывом провода (III типа). Этот механизм состоит из двух пар роликов, причем скорость вращения одной пары роликов в 4 раза меньше скорости вращения другой. Пары роликов расположены таким образом, что разрыв провода за счет разности скоростей подающей и приемной пар роликов происходит в колбе с взрывоопасной смесью.

Для искрообразующего механизма МЭК коэффициент запаса принят $K = 1,5$, для других - $K = 2$. Если увеличение тока или напряжения невозможно, то допускается использование более агрессивных сред, воспламеняющие токи или напряжения которых в K раз меньше этих же параметров рабочей смеси.

Практика использования искрообразующих механизмов II и III типа показала низкую стабильность результатов и повышенную по сравнению с механизмом I типа трудоемкость испытаний. Поэтому в новой редакции ИЕС 60079-11 рекомендовано использовать модифицированный искрообразующий механизм I типа для силы тока 3..10 А. В этом случае вольфрамовые проволочки должны иметь диаметр, увеличенный с 0,2 до 0,4 ($\pm 0,03$) мм и длину, уменьшенную до 10,5 мм. Последнее служит для уменьшения износа кадмиевого диска.

Требование выдерживания коэффициента искробезопасности по току или напряжению испытываемой цепи строго выполняется только для цепей без схем с опережающим отключением, которые обеспечивают искробезопасность не только ограничением тока, напряжения, индуктивности и емкости, но и путем искусственного сокращения длительности разряда или ограничением изменения напряжения на контактах выключателя. Согласно IEC 60079-11 испытания на традиционном искрообразующем механизме (ИОМ) в этом случае могут давать ложные результаты по таким причинам:

- повышение силы тока или напряжения в источнике питания осложнено тем, что невозможна модификация цепи в готовом изделии для обеспечения коэффициента безопасности 1,5;

- источник питания имеет ограниченные нагрузки компонентов в длительном режиме, что не позволяет обеспечить повышение тока;

- в ряде случаев изменения в схеме, обеспечивающие повышение тока (напряжения) могут изменять временные параметры цепей.

Другой способ обеспечения достаточного коэффициента искробезопасности состоит в применении активизированных взрывчатых смесей, имеющих агрессивность выше в заданное число раз (например, в 1,5 раза). Смысл такого подхода состоит в том, что если источник питания показывает отсутствие воспламенения за 400 оборотов ИОМ, т.е. обеспечивается вероятность воспламенения $\leq 6,25 \cdot 10^{-4}$, то в нормальном режиме допускается, что вероятность воспламенения $\leq 1,16 \cdot 10^{-6}$.

Однако были выявлены случаи, когда после испытаний на ИБ источника питания в агрессивной смеси с вероятностью воспламенения $6,25 \cdot 10^{-4}$ не обеспечивалась вероятность воспламенения $1,16 \cdot 10^{-6}$ в нормальных условиях. Это можно объяснить тем, что источники питания с опережающим отключением не подчиняется линейной зависимости логарифмов вероятности воспламенения и тока.

Для преодоления этого положения в IEC 60079-11 предлагается достаточно трудоемкая методика, состоящая в необходимости испытания источника с

использованием газовых смесей с коэффициентом искробезопасности $K_I = SF_x = 1,5$, $SF_y = 2$, $SF_z = 2,5$. Вывод о пригодности данной цепи с точки зрения ее ИБ следует из дальнейшего построения графика зависимости вероятности воспламенения от K_I на логарифмической шкале и сравнения с аналогичным графиком для простой цепи, также полученным в результате испытаний на трех указанных смесях. При этом угол наклона графика для ограниченного нелинейного источника питания должен быть больше, чем аналогичный угол наклона для простой цепи, чем достигается больший K_I при вероятности воспламенения $1,16 \cdot 10^{-6}$.

Рассмотренные особенности экспериментального метода оценки ИБ с помощью взрывных камер позволяют определить его недостатки: высокая трудоемкость и продолжительность испытаний; низкая стабильность и плохая повторяемость результатов; большое количество необходимых испытательных режимов [25]; недоступность для широкого применения в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро на стадии проектирования и проработки схемных решений; сложность обеспечения достоверности камерных испытаний с точки зрения реализации наиболее опасных условий коммутации.

Учитывая проблемы, возникающие при испытаниях во взрывной камере (ВК), исследователи пришли к необходимости разработки бескамерных методов оценки ИБЦ. Их актуальность возрастает в связи с постоянно увеличивающимся объемом электрооборудования в искробезопасном исполнении. На данный момент бескамерные методы (расчетный и электроизмерительный) не исключают сертификационных испытаний в ВК, а являются средством предварительной оценки разрабатываемой аппаратуры, что значительно сокращает сроки ее внедрения в промышленность. Также, в случае если расчетные методы обладают приемлемой точностью, они позволяют максимально использовать допустимый искробезопасный уровень мощности цепи.

В стандартах ИЕС 60079-11 и [26] получила распространение оценка ИБ с помощью зависимостей минимального тока воспламенения от напряжения в

омической цепи, тока от индуктивности и напряжения в индуктивной цепи, напряжения от емкости и сопротивления ограничительного резистора в емкостной цепи. Однако такие зависимости учитывают лишь некоторые простые цепи без источников питания и не во всех случаях обладают высокой точностью расчетов. В работах [27, 28] представлены зависимости минимального напряжения от емкости и сопротивления ограничительного резистора источника питания, учитывающие его влияние. При этом недостатки, присущие вышеуказанному методу не решены.

Поэтому была разработана методика расчетной оценки искробезопасности сложных цепей, использующая принцип эквивалентного замещения сложных цепей простыми с последующим использованием указанных характеристик искробезопасности [29, 30, 31, 32]. В основе эквивалентного замещения сложных цепей простыми лежит одинаковая воспламеняющая способность, основанная на одинаковом законе выделения энергии из простой и сложной цепи в разряд при коммутации этих цепей [33, 34]. Справедливость такого метода замещения была подтверждена экспериментально [35].

Последними работами по определению эквивалентной индуктивности цепей с химическими источниками тока являются труды Толченкина Р. Ю. [36, 37].

Общим недостатком методов эквивалентирования является удовлетворительная достоверность оценки искробезопасности только в узких диапазонах параметров цепей, что ограничивает их практическое применение, в частности к источникам питания с нелинейной ВАХ.

В ГОСТ Р 51330.10–99 приведен метод расчетной оценки искробезопасности электрических цепей по разрядам размыкания, основанный на определении энергии и длительности электрического разряда на каждой из возможных скоростей размыкания контактов и последующего сравнения полученных энергий со значениями воспламеняющих энергий при одинаковых длительностях разрядов и скоростях размыкания контактов. Оценка искробезопасности электрической цепи по данной методике сводится к следующему. При параметрах электрической цепи, используя модель

электрического разряда, расчетным путем определяют энергию разряда за вычетом катодных потерь и его длительность при заданной скорости размыкания контактов V_i из диапазона $V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$. Полученное значение энергии разряда сравнивают со значением минимальной воспламеняющей энергии при такой же длительности и скорости разведения контактов. Электрическая цепь считается искробезопасной, если при всех скоростях разведения контактов энергии электрических разрядов не превышают минимальных воспламеняющих значений энергии разряда, получаемых из зависимостей. Однако, практика использования данного расчетного метода показала удовлетворительную сходимость полученных этим методом расчетных результатов и экспериментальных только для узкого диапазона напряжений омической цепи. Для других типов цепей (индуктивная, индуктивная с диодным шунтом, а также источников питания) возникали существенные трудности с определением выделяемой энергии и времени разряда, а сравнение с данными экспериментов не проводились.

На сегодняшний день самым прогрессивным направлением расчетной оценки искробезопасности являются методы, основанные на компьютерном моделировании процесса дуговой коммутации в электрических цепях [38, 39, 40, 41, 42].

Работы [43, 44] показывают, что методы [38, 39, 40] имеют следующие недостатки:

- в модели принимается тепловая постоянная инерции дугового разряда неизменной и равной 1 мкс. В результате расчетов установлено и экспериментально подтверждено, что за период коммутации ее значение изменяется в сотни раз. Игнорирование этого явления приводит к росту ошибок расчета (до 517%) источников питания с опережающей защитой, а также индуктивных цепей (до 260%);

- зависимости, полученные на основе графиков, приведенных в ГОСТР 51330.10-99 содержат два участка с временем перегиба T_{π} и не охватывают процессы выделения энергии при исследовании устройств с сокращенной продолжительностью разряда, т.е. менее $T_{\pi} / 2,5 = 10-25$ мкс. Вследствие этого

существенно усложняется оценка опасных режимов работы источников с опережающей защитой и других быстродействующих устройств;

- рассматривается разряд размыкания емкостной цепи, вместо разряда замыкания, который является более опасным, так как только в этом случае конденсатор может быть заряжен до напряжения источника питания. Что приводит к заниженным расчетным показателям длительности разряда (до 4 раз), выделяемой энергии в нем. И, соответственно, влияет на точность оценки.

Анализ показал, что метод [41] является наиболее перспективным на сегодняшний день, т. к. он имеет самую низкую погрешность (10-20 %) значений емкости цепи, полученных при моделировании и из графиков зависимостей $C(U,R)$. Расхождение значений параметров разряда (продолжительность, энергия разряда, максимальный ток), полученных при моделировании данным методом и путем эксперимента, которое достигает 16-20 % [45]. Это связано с тем, что параметры, принятые в математической модели данного метода, не учитывают фактическую динамику и установившееся значение напряжения на разряде, а также влияние полярности контактирующих пар. Кроме того, выявлено, что данный метод не предназначен для оценки искробезопасности емкостных цепей с длительностями разряда: для 20 В - менее 40 мкс, 30 В – менее 11 мкс.

Следовательно, данным методом невозможно оценить искробезопасность источников с опережающей защитой с низкими напряжениями, у которых длительность разряда, как правило, не превышает нескольких микросекунд. Оценка с длительностями разряда менее 1 мс представляет собой метод аппроксимации по 3-м ближайшим напряжениям и фиксированной длительности разряда для расчета допустимой (воспламеняющей) энергии.

Для устранения данных недостатков необходимо установить зависимости минимальной воспламеняющей энергии от длительности разряда (с учетом малых значений) и напряжения цепи, вывести уравнение установленной зависимости.

В работе [46] продемонстрирована возможность использования расчетного метода для оценки источников питания с опережающим отключением, а также резистивных и индуктивных цепей. При этом расхождение расчетных предельных

искробезопасных параметров с данными экспериментальных испытаний составляет от 3 до 14%. В модели определяется тепловая постоянная инерции дугового разряда по усредненным значениям мощности разряда и не учитывает динамику ее изменения. Что приводит к неоптимальной сходимости результатов моделирования. На сегодняшний день отсутствуют достоверные экспериментальные сведения о динамике изменения ее значений на протяжении дугового разряда в слаботочной цепи.

1.3 Характеристика искробезопасных источников питания систем освещения

В зависимости от вида применяемых способов и средств обеспечения искробезопасности можно выделить четыре типа источников питания [47]:

- а) с линейной вольтамперной характеристикой (ВАХ);
- б) с нелинейной вольтамперной характеристикой в режиме стабилизации тока;
- в) с загибом нелинейной вольтамперной характеристики;
- г) с искусственным сокращением длительности электрического разряда, возникающего при каждой коммутации цепи (опережающая защита).

Наиболее распространенный тип источников – это искробезопасный источник питания с линейной нагрузочной характеристикой или параметрический [48] (рисунок 1.5). Примером такого рода источников является блок питания TX6661 (Trolex, Великобритания), барьеры MTL7700 серии (MTLinstruments, Китай) напряжением постоянного тока и параметрический источник для цепей дистанционного управления [49] переменного тока.

Ограничение тока короткого замыкания I_{kz} до искробезопасной величины достигается повышением внутреннего омического сопротивления источника R_i , а ограничение напряжения – за счет стабилитронов VD .

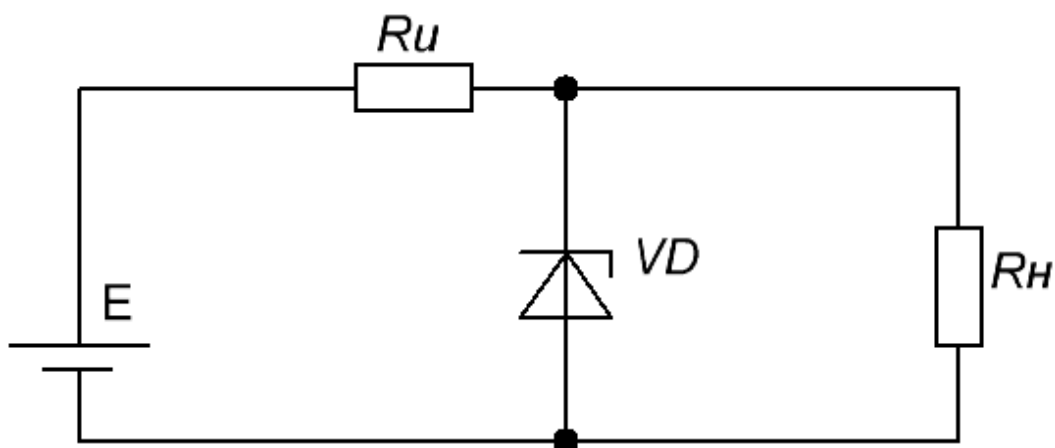


Рисунок 1.5 – Искробезопасный источник питания с линейной ВАХ

Нагрузочная характеристика такого источника линейна и имеет вид:

$$U = E \cdot \left(1 - \frac{I}{I_{kz}}\right) = E \cdot \left(1 - \frac{R_u}{R_n + R_u}\right) \quad (1.1)$$

где E – э.д.с источника; R_n – сопротивление нагрузки.

Мощность P_n , которая может быть получена в нагрузке, достигает максимума при равенстве сопротивления нагрузки R_n и внутреннего сопротивления источника питания R_u :

$$P_n = \frac{E^2}{4 \cdot R_u} \quad (1.2)$$

Поскольку же мощность короткого замыкания источника равна:

$$P_{kz} = \frac{E^2}{R_u} \quad (1.3)$$

Из выражений (1.2) и (1.3) следует:

$$P_n = \frac{P_{kz}}{4} \quad (1.4)$$

Т.е. при искробезопасном источнике с линейной нагрузочной характеристикой в нагрузке может быть использовано не больше четверти полной искробезопасной мощности, так как мощность короткого замыкания не может быть больше искробезопасной мощности.

Источник с линейной нагрузочной характеристикой неудобен из-за низкого коэффициента использования искробезопасной мощности в нагрузке, а также из-за больших колебаний напряжения при изменении тока в нагрузке, что неприемлемо (или неудобно) при питании нескольких нагрузок от одного источника питания.

Такого рода источники питания нашли широкое применение для питания нагрузок, мощностью до 8,5 Вт (датчиков, интерфейсов, токовых петель и т.д), а также они приемлемы для обеспечения искробезопасности уровня Ia в соответствии с директивой АТЕХ, где в качестве ограничителей тока допускаются только ограничительные резисторы.

Один из путей повышения полезной искробезопасной мощности – ее приближение к полной мощности за счет формирования специальных нагрузочных характеристик источника питания, т.е за счет создания специальных искробезопасных источников питания. Стремление увеличить коэффициент использования предельной искробезопасной мощности и одновременно стабилизировать напряжение привело к созданию источников питания с нелинейной нагрузочной характеристикой в режиме стабилизации тока (рисунок 1.6).

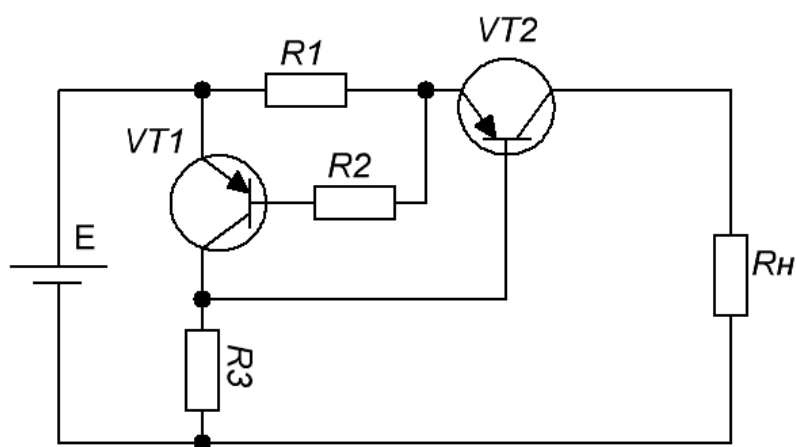


Рисунок 1.6 – Искробезопасный источник питания с нелинейной ВАХ в режиме стабилизации тока

Примером такого рода источников является блок питания АГАТ-ВН-12.15 (НПП «Электроаппарат», Украина), БП12 (ОАО «МЗША», Украина).

Ограничение тока короткого замыкания I_{kz} до искробезопасной величины достигается повышением внутреннего сопротивления ключа $VT2$ (его закрытие) при превышении тока уставки, измеренного за счет детектора тока $R1$, $VT1$.

Идеальная форма нагрузочной характеристики – это прямоугольная двухотрезочная характеристика abc (рисунок 1.7), при которой ток нагрузки может быть почти равен току короткого замыкания. Получить такую идеальную характеристику затруднительно. Поэтому характеристики всех практически источников располагаются ниже идеальной – кривая adc , но выше обычной линейной – прямая ac .

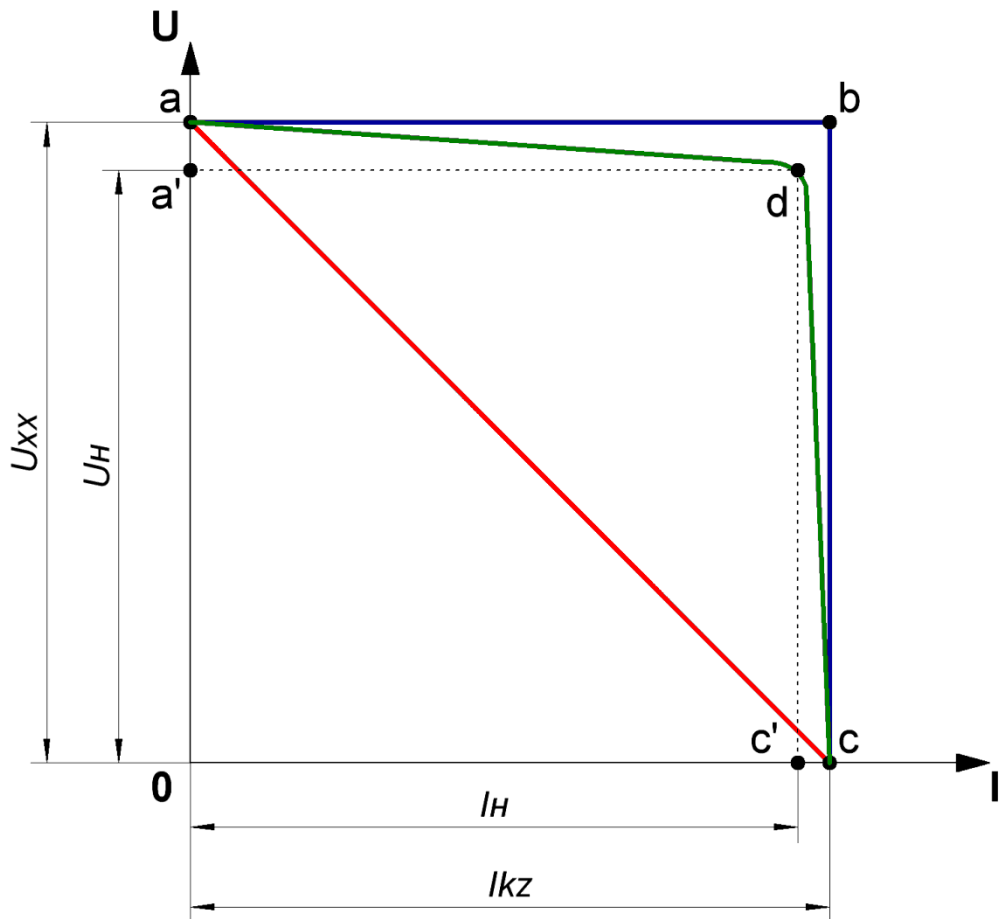


Рисунок 1.7 – Нагрузочные характеристики источников питания

При идеальной нагрузочной характеристике abc – максимальная полезная мощность в пределе равна $E \cdot I_{kz}$, пропорциональна площади $abc0$; при реальной

характеристике adc – максимальная полезная мощность, пропорциональная максимуму функции, выражающей площадь прямоугольника $a'dc'O$.

Коэффициент использования мощности короткого замыкания равен:

$$k = \frac{I_n \cdot U_n}{I_{kz} \cdot U_{xx}} \quad (1.5)$$

где U_{xx} – напряжение холостого хода.

В зависимости от формы нагрузочной характеристики k может принимать значения от 0,25 до 1,0. Последние значения достигаются при приближении нагрузочной характеристики adc к прямоугольной характеристике abc .

Возможность четырехкратного повышения использования мощности короткого замыкания неоднозначна такому же увеличению мощности в нагрузке. Это обусловлено тем, что воспламеняющая способность коммутационных разрядов в режиме короткого замыкания источников с линейной и прямоугольной характеристиками при равных величинах тока короткого замыкания и напряжений холостого хода (э.д.с) неодинакова.

Энергия, выделяемая в разряд при прямоугольной характеристике в 3 раза больше, чем при линейной.

Такого рода источники питания нашли широкое применение для питания нагрузок, мощностью до 18 Вт (систем автоматизации, датчиков и т.д). На их основе строятся системы локального освещения.

Основным недостатком данных источников является существенное тепловыделение на ключевом транзисторе $VT2$ в режиме к.з, соизмеримой с мощностью короткого замыкания.

С целью борьбы с данным недостатком разработаны, в том числе автором [50, 51] и широко применяются источники питания с нелинейной характеристикой «с загибом» (рисунок 1.8). Примером такого рода источников являются БПМ (ДП НПФ «ШАТЛ», Украина), БПИ-РПА (ООО «НПП-РУДПРОМАВТОМАТИКА», Украина).

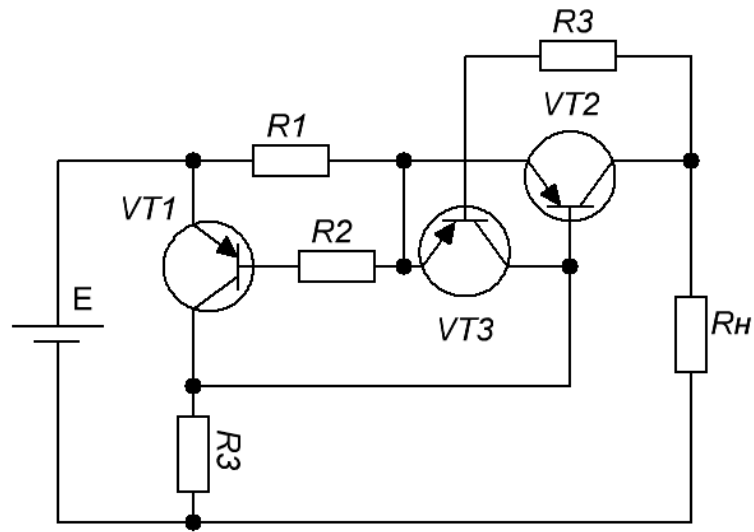


Рисунок 1.8 – Искробезопасный источник питания с загибом ВАХ

Типовая форма нагрузочной характеристики с загибом - abd (рисунок 1.9), при которой ток нагрузки может быть почти равен току уставки.

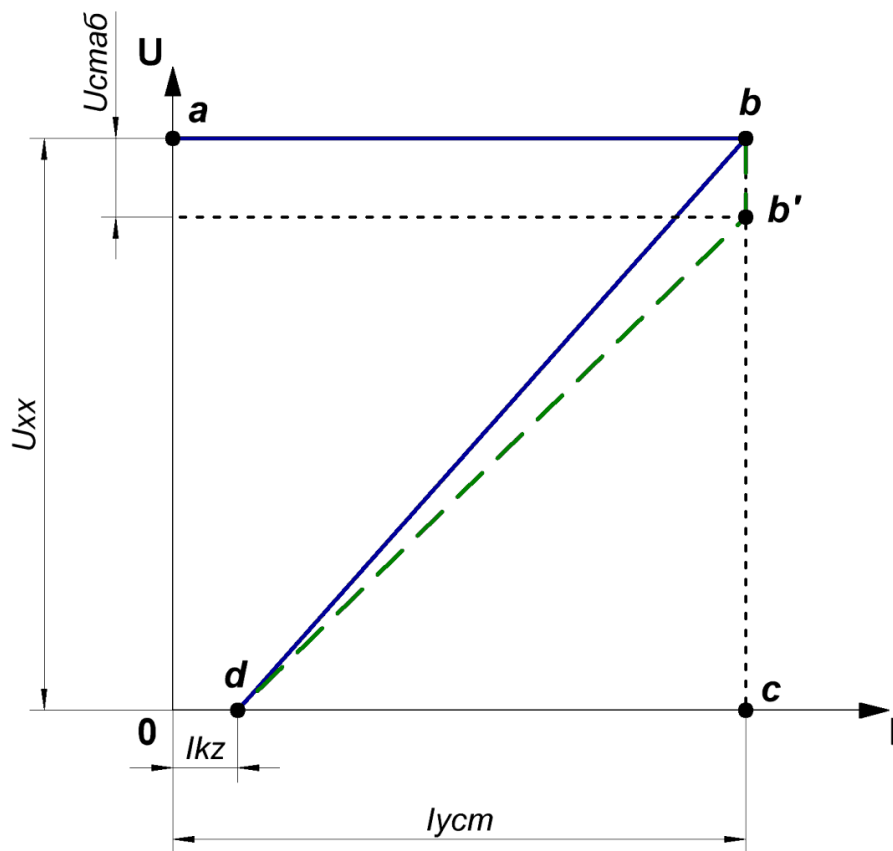


Рисунок 1.9 – Нагрузочная характеристика источников питания с загибом

При достижении тока, протекающего через ключ VT_2 , до уровня уставки происходит его полное закрытие за счет обратной связи R_3 , VT_3 (остаточный ток I_{kz} составляет десятки мА).

Данная характеристика предотвращает рассеивание большой мощности на ключе VT_2 . Максимальная полезная мощность, пропорциональна максимуму функции, выражающей площадь прямоугольника $abc0$. Однако, источник с нелинейной нагрузочной характеристикой abd способен срабатывать при пусковых токах нагрузки, содержащей конденсаторы, ШИМ преобразователи и прочие нелинейные элементы. Данный недостаток частично устраняется при формировании источником питания нагрузочной характеристики $abb'd$ (рисунок 1.9). Участок bb' характеризуется режимом стабилизации тока с падением напряжения $U_{стаб}$, что позволяет ограничить пусковые токи нагрузки на уровне тока уставки $I_{уст}$ после чего вернуться на рабочий отрезок ab , но в случае короткого замыкания – в точку d .

Полезная мощность источника с загибом нелинейной ВАХ соизмерима с мощностью источников со стабилизацией тока.

Формирование нелинейной характеристики источников питания позволило увеличить искробезопасную мощность нагрузки до 15-20 Вт [52, 53]. Однако этой мощности в ряде случаев недостаточно для обеспечения работоспособности энергоемких систем аппаратуры автоматики и связи (электрогидравлических клапанов, освещения протяженных выработок).

Одним из наиболее важных направлений в области повышения искробезопасной мощности источников питания следует признать разработку Красицом Я. Л., Кравченко В. С., Ерыгиным А. Т., Погорельским А. Е., Кириченко Б. М. и др. исследователями способа искусственного сокращения длительности разряда (опережающее отключение), позволившего на порядок увеличить искробезопасную мощность источников питания [54, 55, 56]. До настоящего времени данное направление обеспечивает наилучшие результаты в мощных искробезопасных системах питания, в которых нагрузка допускает перерывы питания на несколько миллисекунд.

Принцип опережающего отключения не ограничивает мощность цепи в номинальном режиме, а срабатывает по сигналу датчика начала разряда и лимитирует энергию, поступающую из элементов цепи в разряд, только в момент аварийной коммутации за счет сокращения времени ее выделения [57, 58]. Это позволяет в номинальном режиме работы использовать мощность для рудничного электрооборудования, значительно превышающую допустимую при статических схемах искрозащиты в рассмотренных способах а)-в). Ограничение длительности разряда может быть обеспечено в результате контроля начала коммутации и последующего (за единицы микросекунд) отключения источника от внешней цепи. Контроль начала коммутации осуществляется по изменению тока или напряжения источника питания, а также по наличию высокочастотных составляющих напряжения на выходных зажимах источника [59, 60]. Обеспечение искробезопасности таких источников имеет ряд особенностей. Одной из них является то, что напряжение питания почти не влияет на величину искробезопасного тока. Напряжение на электрическом разряде в начальный момент коммутации равно напряжению зажигания дуги – 8 В [61] и увеличивается по мере развития разряда. Если отключение источника происходит в течение первых нескольких микросекунд, то напряжение на разряде близко к 8 В и не зависит от напряжения источника. Энергия, выделяемая в разряде за это время, определяется величиной коммутируемого тока и длительностью разряда. Из этого следует, что величина искробезопасной мощности таких источников питания возрастает при увеличении их выходного напряжения и определяется коммутируемым током и временем срабатывания искрозащиты.

Известны три основных способа построения опережающего отключения: шунтирование источника питания или участка цепи с разрядом; отключение (изоляция) цепи питания от участка с разрядом; комбинированный (шунтирование и изоляция).

Первый способ не может применяться в цепях, содержащих распределенную индуктивность и кабельную линию из-за низкой эффективности ограничения энергии, запасенной в них [62]. В случае кабельных линий

эффективное ограничение энергии разряда обеспечивается с помощью второго и третьего способа за счет последовательной отключающей защиты [63] и позволяет увеличить ток более чем в 3 раза по сравнению с первым способом. Работы [64, 65, 66] показывают, что наибольшую эффективность по ограничению полезной энергии разряда имеет комбинированное опережающее отключение в цепях от 70 В и при значительных величинах индуктивности источника, кабельной линии и нагрузки. Наряду с ограниченной областью эффективного применения комбинированного опережающего отключения по сравнению с отключением (изоляцией), данный способ сложнее в реализации.

В настоящее время в источниках питания с опережающим отключением широко распространен способ отключения (изоляция). На этом принципе созданы источники питания ИПИ-24-3, ИПИ-12-6 (ДИГ, Украина), АГАТ ВН-24.30, АГАТ ВН-12.60 (НПП «Электроаппарат», Украина). Вышеуказанные источники имеют возможность передавать большую мощность до 72 Вт за счет сокращения длительности разряда до 26 мкс – это их достоинство. При этом достигнутой мощности недостаточно для реализации питания системы освещения протяженных выработок.

Недостатки – это значительная сложность источников, применение нагрузки с устройством плавного увеличения тока с определенной скоростью, ограничение в длине питающей линии (55 мкГн, что соответствует 50-100м кабеля в зависимости от его сечения), низкая помехозащищенность от ложных срабатываний за счет высокой чувствительности [67]. Несмотря на это данный принцип обеспечения искробезопасности в источниках питания остается перспективным и актуальным.

Необходимо отметить, что параметры линии ограничивают точность контроля момента начала аварийного разряда и, следовательно, эффективность всей искрозащиты с опережающим отключением. Это обусловлено влиянием кабеля на амплитуду и запаздывание сигнала, выделяемого на датчике контроля коммутации, которое определяет время срабатывания искрозащиты [68, 69, 70, 71, 72].

На сегодняшний день в ДНР, РФ и странах Европы не разработаны искробезопасные источники питания повышенной мощности, подходящие по параметрам для систем освещения протяженных выработок. Для достижения требуемой повышенной мощности в источниках питания целесообразно применять способ опережающего отключения, при этом учитывать влияние параметров кабельной линии.

1.4 Постановка задачи исследования

Выполненный анализ материала позволил сформулировать цель и задачи.

Целью исследования является обеспечение безопасной эксплуатации искробезопасных цепей систем освещения очистных выработок путем раскрытия закономерностей процессов выделения электрической цепью энергии в разряд и условий поджигания им взрывчатой смеси в зависимости от его параметров, что обеспечит повышение безопасности труда в угольных шахтах, опасных по газу и пыли.

Для достижения цели диссертационного исследования поставлены и решены задачи:

1. Провести анализ способов обеспечения взрывобезопасности, характеристик искробезопасных источников систем освещения, а также уровня методов оценки, разработки и сертификации искробезопасных цепей.

2. Выполнить исследования процесса дугового разряда, возникающего при замыкании индуктивно-ёмкостных цепей и установить влияние полярности, напряжения, прикладываемого к контактной паре вольфрам-кадмий на параметры разряда (значения установившегося анодно-катодного напряжения, его постоянной времени и выделяемой энергии).

3. Разработать математические модели разрядов, возникающих при замыкании индуктивно-ёмкостных цепей и при размыкании индуктивно-резистивных цепей сложной конфигурации, позволяющие производить расчёт энергии, выделяемой в разряд и его длительности.

4. Установить зависимости для расчёта минимальной воспламеняющей энергии разряда, возникающего при замыкании ёмкостных цепей напряжением от 20 до 300 В и длительности разряда.

5. Развить расчётный метод «бескамерной тепловой оценки» искробезопасности электрических цепей, который повысит достоверность при оценке источников питания с динамической защитой.

6. Установить зависимости для расчёта допустимого искробезопасного тока источников питания с динамической защитой и индуктивно-резистивной нагрузкой от напряжения цепи в диапазоне 30...90 В, ее индуктивности в пределах 30...5000 мкГн и времени срабатывания источника 1...15 мкс.

7. Обосновать параметры безопасности и разработать электрическую схему источника питания с повышенной искробезопасной мощностью.

ГЛАВА 2

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОЦЕНКИ
ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ РАЗРЯДОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЗАМЫКАНИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С ДИНАМИЧЕСКОЙ
ЗАЩИТОЙ

2.1 Оценка влияния полярности напряжения, прикладываемого к контактной паре вольфрам-кадмий на параметры разряда

В большинстве случаев взрывозащищенное электрооборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «i»» содержит емкостные цепи, определяемые наличием конденсаторов в электрической схеме и в виде распределенных параметров кабельной линии. Данные цепи могут состоять из одних конденсаторов (типа C), содержать последовательные ограничительные резисторы (типа RC) и другие безреактивные элементы, в том числе полупроводниковые и индуктивные элементы (типа RLC).

При оценке искробезопасности индуктивно-емкостных цепей следует учитывать разряд при замыкании контактов как наиболее опасный вид для данных цепей [73, 74]. При этом рассматриваются однократное замыкание и прерывистое искрение. Такие два вида искрообразования характерны при испытании цепей с заряженными конденсаторами в индуктивно-емкостных цепях, являясь для них наиболее агрессивными в отношении воспламенения взрывчатых газовых смесей [75, 76].

При замыкании емкостной электрической цепи возникновение электрического разряда возможно в следующих случаях:

а) По мере сближения контактов пробоя межконтактного промежутка не происходит. В момент соприкосновения контактов плотность тока недостаточно велика и не приводит к расплавлению металла контактов в точках соприкосновения.

В этом случае или не происходит разряда при замыкании цепи, или, если скорость сближения контактов достаточно велика, то разряд возникает при отскакивании контакта и рассматривается как дуговой разряд размыкания.

Такие разряды возникают при коротком замыкании индуктивно-емкостных цепей с преобладанием индуктивной составляющей.

б) При сближении электродов, соединенных с заряженным конденсатором, происходит однопробойный дуговой разряд. Подобный вид разряда наблюдается при прерывистом искрении в индуктивно-емкостных цепях. Такие разряды могут быть опаснее разрядов размыкания, так как в момент пробоя, при максимальном расстоянии между контактами в разряде выделится большая часть энергии, запасенной в емкости.

в) При сближении контактов пробоя межконтактного промежутка не происходит, однако, при соприкосновении контактов плотность тока в точках соприкосновения вызывает расплавление и испарение материала контактов и дуговой разряд возникает в межконтактном промежутке, насыщенном парами металла. Такие разряды возникают при коротком замыкании емкостных цепей. При малых значениях коммутируемого тока, ниже 0,25 А, возникают многопробойные искровые разряды, т. к. для возникновения и поддержания дуги коммутируемого тока недостаточно.

Осциллографические исследования разрядов замыкания в таких цепях позволили отметить ряд особенностей изменения напряжения на разряде в зависимости от величины ограничительного сопротивления, или, другими словами, в зависимости от величины протекающего через разряд тока и реализуемой в нем мощности. Так, например, при малых ограничительных сопротивлениях напряжение на разряде меняется в зависимости от величины протекающего через него тока.

При достаточно больших ограничительных сопротивлениях напряжение на разряде остается практически неизменным за время его существования и приблизительно равным 11-12 В.

Разряд цепи с малыми сопротивлениями имеет небольшую продолжительность, и его опасность определяется количеством энергии, которая выделилась. Отсюда видно, что в общем случае для описания разрядов замыкания требуется достаточно простая модель постоянства напряжения на разряде. Ввиду своей простоты такая модель использовалась различными исследователями при рассмотрении емкостных цепей с принятым значением напряжения на разряде 10 В, 11 В, 12В.

Однако результаты экспериментальных исследований показывают, что величина напряжения на разряде определяется начальным напряжением на емкости и материалом контактирующих пар. В работе [77] установлено, что напряжение пробоя в случае, когда катодом служил кадмиевый диск, на 10-19 % больше, чем напряжение пробоя в случае, когда катодом являлась вольфрамовая проволочка. Это косвенно подтверждает влияние полярности контактирующих пар (вольфрам, кадмий) на величину напряжения на разряде, особенно в случае образования однопробойного дугового разряда при сближении контактов (вариант б).

Таким образом, в настоящее время не до конца исследованы разряды короткого замыкания емкостной искробезопасной цепи. Поскольку однозначно не определена зависимость величины напряжения разряда от начального напряжения на емкости и от материала контактирующих пар, а также не раскрыто влияние полярности коммутации на длительность разряда и выделяемую энергию.

С целью формирования и исследования экспериментальных зависимостей переходных процессов замыкания RC , RLC цепей (ток разряда и напряжение на разряде), спроектирован специальный искрообразующий механизм (ИМ) разрядов замыкания. К искрообразующему механизму (рисунок 2.1) предъявлялись следующие основные требования:

- 1). Регулирование в широком диапазоне скорости замыкания контактов;
- 2). Хорошая повторяемость характеристик замыкания контактов;

3). Соответствие пламегасящего действия и материала контактов принятому стандартному искрообразующему механизму 1-го типа.

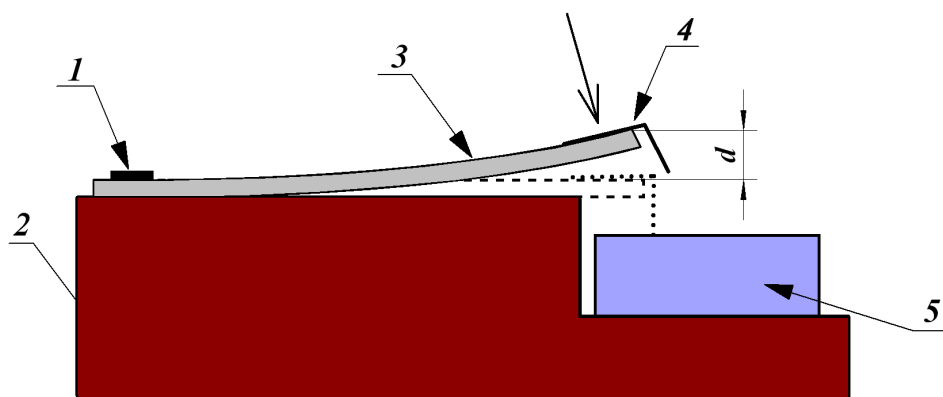


Рисунок 2.1 – Искрообразующий механизм

ИМ представляет собой основание (2) из диэлектрического материала, на котором закреплены: с помощью фиксатора (1) пружинная проводящая пластина (3) и кадмиевый диск (5), используемый в искрообразующем механизме при испытаниях электрических цепей камерным способом. В свою очередь на конце пружинной пластины закреплена изогнутая вольфрамовая проволока (4), диаметром 0,2 мм, также используемая в искрообразующем механизме 1-го типа при испытаниях электрических цепей камерным способом.

Данная конструкция ИМ позволяет регулировать скорость замыкания контактов. Отклонение пластины d прямо пропорционально скорости замыкания проволоки с диском за счет увеличения силы противодействия в пластине при большем отклонении. Длительность разрядов замыкания является максимальной при низкой скорости замыкания контактов.

Схема регистрации экспериментальных зависимостей переходных процессов RC , RLC цепей при замыкании (рисунок 2.2) включает в себя:

- блок питания постоянного тока с регулируемым и стабилизированным выходным напряжением (БП);
- токоограничительный резистор $R1$, исключаяющий влияние энергии БП в цепи разряда;

- исследуемую RLC цепь с элементами $C1$, $L1$, $R2$;
- кнопку $S1$, позволяющую исследовать как RLC так и RC цепи;
- кнопки $S2$, $S3$, позволяющие производить смену полярности напряжения на элементы ИМ: вольфрамовую проволоку (WO) и кадмиевый диск (Cd);
- искрообразующий механизм ИМ;
- цифровой запоминающий осциллограф TPS2024 фирмы Tektronix с каналами 1 ($OSC1$) и 2 ($OSC2$) соответственно.

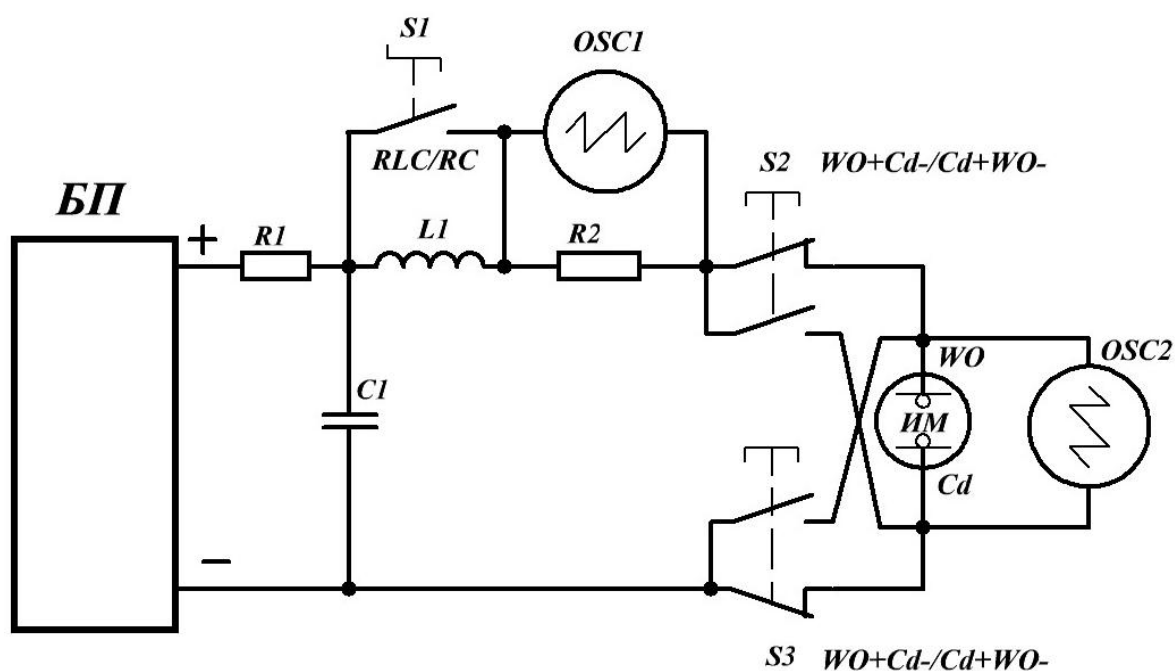


Рисунок 2.2 – Схема регистрации экспериментальных зависимостей

Известно, что длительность разрядов замыкания является максимальной при низкой скорости замыкания контактов.

С помощью ИМ (рисунок 2.1), подключенного по схеме (рисунок 2.2) записаны переходные процессы разрядов замыкания аperiodической RC цепи при разных напряжениях: 30 В, 50 В, 70 В и с чередованием полярности на контактах. При неизменных значениях $R2=3,8$ Ом, $L1=0$ мкГн, $C1=4$ мкФ.

Детальный анализ длительности разрядов, максимального тока разряда и выделяемой энергии в разряд данных переходных процессов приведен в приложении А.

Для удобства расчет выделяемой энергии в разряд W_p производился с помощью пакета MathCAD [78] с учетом мгновенных значений полученных массивов данных переходных процессов по формуле 6 в пределах тока обрыва $I_0=0,5$ А.

$$W_p = \sum_{i=1}^N U_{p_i} \cdot I_{p_i} \cdot \Delta t, \text{ Дж} \quad (2.1)$$

где W_p – энергия, выделившаяся в разряд, Дж; U_{p_i} – мгновенные значения напряжения разряда, В; I_{p_i} – мгновенные значения тока разряда, А; Δt – интервал времени между соседними значениями, с; i – номер значения в массивах данных в диапазоне от 1 до N ; N –общее количество значений в массивах данных, шт.

На рисунках 2.3, 2.4 представлены характерные экспериментальные зависимости напряжений разряда U_p и токов разряда I_p от времени из записанных переходных процессов разряда при замыкании RC цепи с приложенной полярностью $WO-Cd+$.

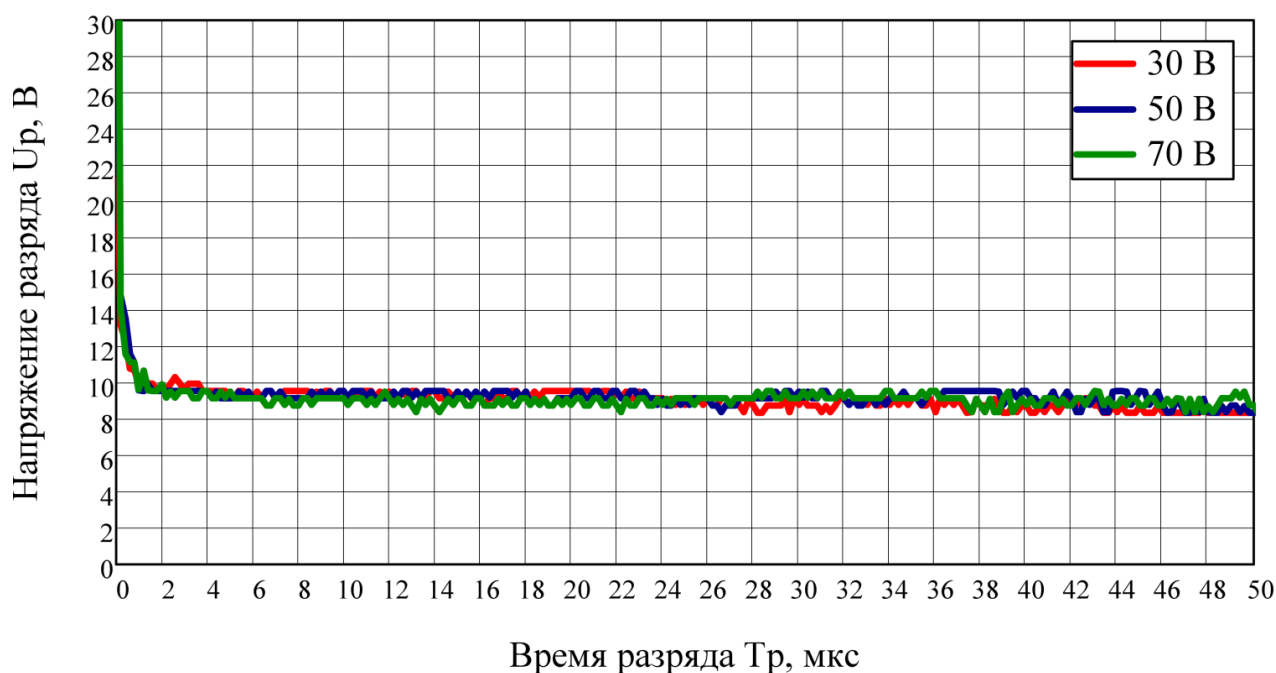


Рисунок 2.3 – Типовая зависимость напряжения разряда U_p от времени при разных напряжениях цепи: 30В (кривая 1); 50В (кривая 2); 70В (кривая 3) и полярности $WO-Cd+$.

Длительность времени между отсчетами для осциллограмм составляет 200 нс. Ввиду незначительной величины амплитуды высокочастотных изменений напряжения и тока на разряде, они исключены из рассмотрения.

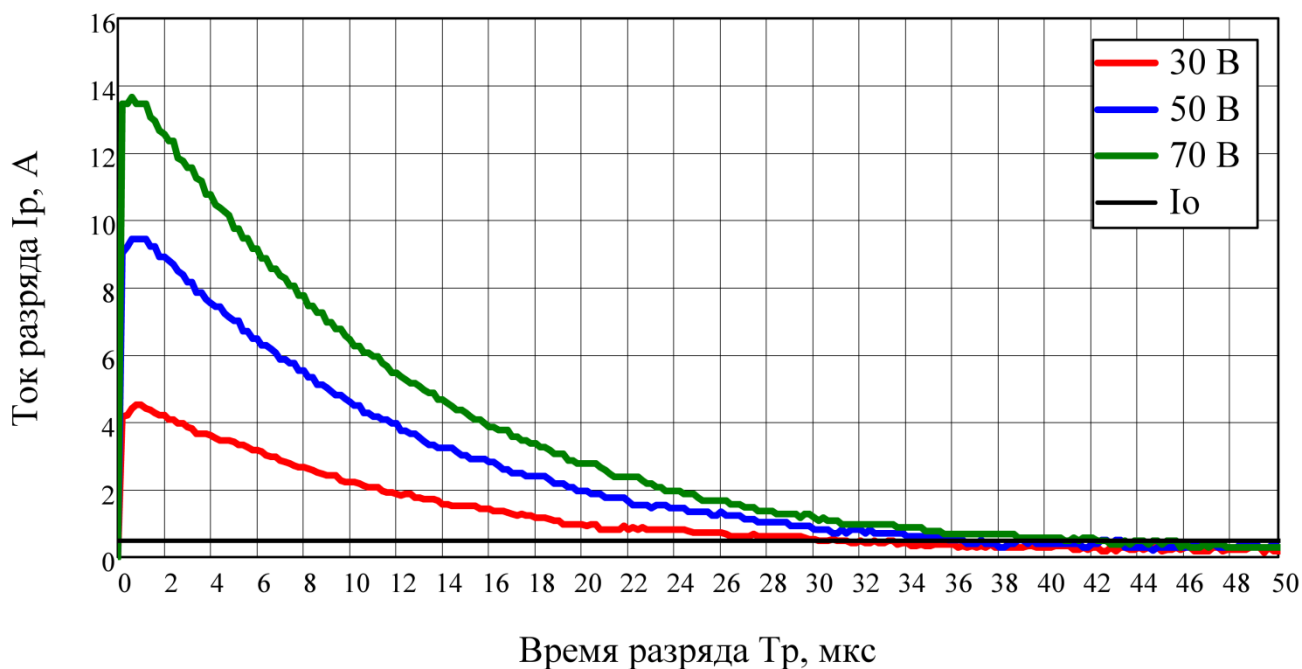


Рисунок 2.4 – Типовая зависимость тока разряда I_p от времени при разных напряжениях цепи: 30В (кривая 1); 50В (кривая 2); 70В (кривая 3), ток обрыва дуги $I_0=0,5\text{А}$ (кривая 4) и полярности $WO-Cd+$.

Для этого проведено сглаживание, используя встроенную функцию *ksmooth* пакета Mathcad согласно выражению (2.2, 2.3). Данная функция использует сглаживание при помощи Гауссова ядра данных из T .

$$U_{smooth} = ksmooth(T, U, 2 \cdot dT), \text{ В} \quad (2.2)$$

$$I_{smooth} = ksmooth(T, I, 2 \cdot dT), \text{ А} \quad (2.3)$$

где U_{smooth} , I_{smooth} – массивы сглаженных значений напряжения и тока разряда соответственно; T – массив времени; U , I – массивы не сглаженных значений напряжения и тока разряда соответственно; $2dT$ – ширина окна сглаживания, равная двум значениям шага по времени dT между отсчетами.

Как видно из рисунков 2.3, 2.4 максимальное значение тока разряда достигает при напряжении разряда 11...12 В за время 0,6-0,7 мкс. Напряжение разряда U_p имеет неярко выраженную линейную спадающую зависимость от времени разряда в диапазоне от 10,1 В до 8,5 В, при среднем значении 9,3 В и не соответствует уровню для омической цепи при разрядах размыкания [79].

На рисунках 2.5, 2.6 представлены характерные экспериментальные зависимости напряжений разряда U_p и токов разряда I_p от времени из записанных переходных процессов разряда при замыкании RC цепи с приложенной полярностью $WO+Cd$.

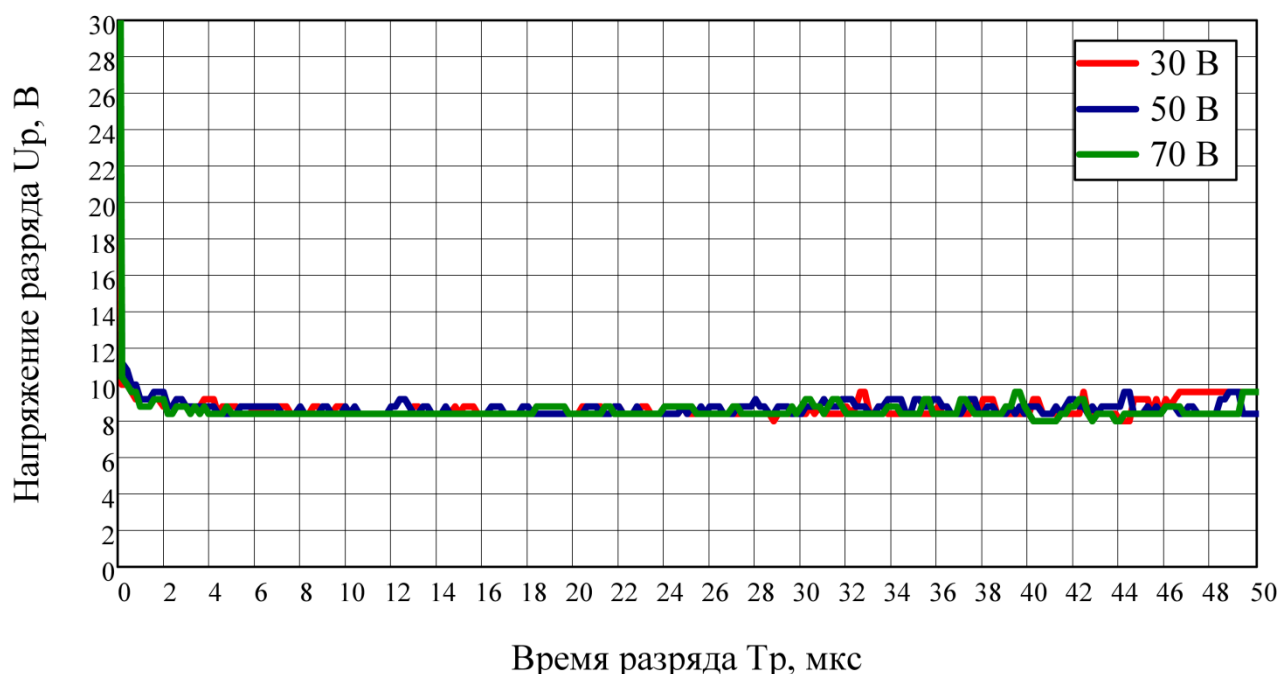


Рисунок 2.5 – Типовая зависимость напряжения разряда U_p от времени при разных напряжениях цепи: 30В (кривая 1); 50В (кривая 2); 70В (кривая 3) и полярности $WO+Cd$.

Как видно из рисунков 2.5, 2.6 максимальное значение тока разряда достигает при напряжении разряда 10...11 В за время 0,5-0,6 мкс. Напряжение разряда U_p имеет более прямолинейную зависимость от времени разряда,

колеблющуюся в диапазоне от 10,1 В до 7,7 В, при среднем значении 8,9 В и не соответствует уровню для омической цепи при разрядах замыкания.

Данные исследования подтвердили постоянство напряжения на разряде в установившемся режиме за время существования разряда. Установлено, что при положительной полярности на вольфрамовом электроде установившееся значение напряжения на разряде составляет $8,9 \pm 1,2$ В, а при отрицательной – $9,3 \pm 0,8$ В. Величина напряжения на разряде определяется материалом контактирующих пар и не зависит от начального напряжения на емкости.

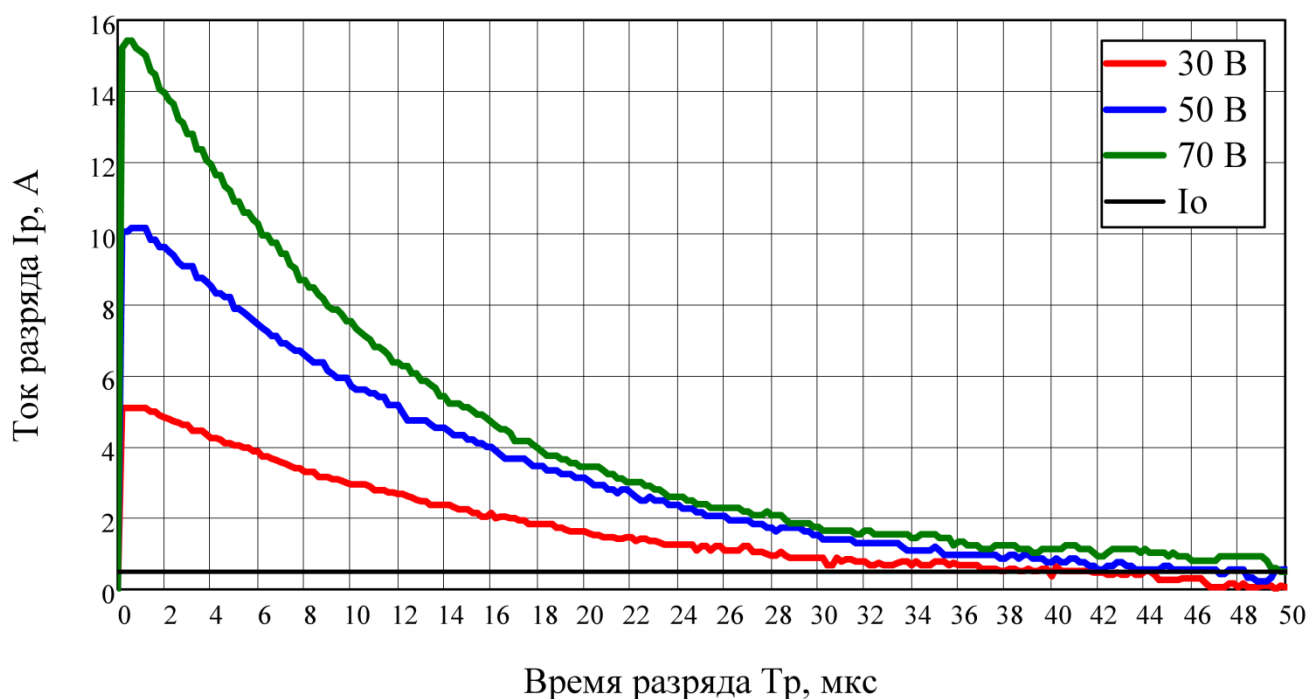


Рисунок 2.6 – Типовая зависимость тока разряда I_p от времени при разных напряжениях цепи: 30В (кривая 1); 50В (кривая 2); 70В (кривая 3), ток обрыва дуги $I_0=0,5$ А (кривая 4) и полярности $WO+Cd$.

В таблицах 2.1 - 2.3 приведены значения энергии дугового разряда W_p , длительности разряда T_p при токе обрыва дуги $I_0=0,5$ А, максимального тока разряда I_{max} переходных процессов разрядов замыкания аperiodической RC цепи (приложение А).

Среднее арифметическое значение результатов измерений \bar{x} согласно [80]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.4)$$

n – количество измерений; x_i – i -ый результат измерения.

Таблица 2.1 - Экспериментальные значения энергии дугового разряда

$U_{\text{БП}}, \text{В}$	\bar{x} , мкДж (формула 2.4)	Δ , мкДж (формула 2.8)	Примечание
<i>WO-Cd+</i>			
30	560	$\pm 56,88$	Типовые разряды (рис. 2.3, 2.4)
50	1150	$\pm 119,7$	
70	1560	$\pm 160,4$	
<i>WO+Cd-</i>			
30	688	$\pm 71,4$	Типовые разряды (рис. 2.5, 2.6)
50	1430	$\pm 148,7$	
70	2150	$\pm 223,9$	

Среднее квадратическое отклонение S :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.5)$$

Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического $S_{\bar{x}}$:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2.6)$$

Доверительные границы случайной погрешности измеряемой величины ε :

$$\varepsilon = t \cdot S_{\bar{x}} \quad (2.7)$$

t – коэффициент Стьюдента

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины Δ :

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma} \quad (2.8)$$

K – коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности (формула 2.9), S_{Σ} – суммарное среднее квадратическое отклонение (формула 2.11).

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta_{\Sigma}}{S_x + S_{\Theta}} \quad (2.9)$$

Θ_{Σ} – граница неисключенной систематической погрешности (сумма погрешностей метода, средства измерений, вызванные другими источниками), S_{Θ} – среднее квадратическое отклонение неисключенной систематической погрешности (формула 2.10).

Среднее квадратическое отклонение неисключенной систематической

погрешности S_{Θ} :

$$S_{\Theta} = \frac{\Theta_{\Sigma}}{\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

Суммарное среднее квадратическое отклонение S_{Σ} :

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\Theta}^2 + S_x^2} \quad (2.11)$$

Таблица 2.2 - Экспериментальные значения длительности разряда

$U_{\text{БП}}, \text{В}$	$\bar{x}, \text{мкс}$ (формула 2.4)	$\Delta, \text{мкс}$ (формула 2.8)	Примечание
<i>WO-Cd+</i>			
30	31	$\pm 1,044$	Типовые разряды (рис. 8, 9)
50	37	$\pm 1,1$	
70	41	$\pm 1,06$	
<i>WO+Cd-</i>			
30	39	$\pm 1,079$	Типовые разряды (рис. 10, 11)
50	49	$\pm 1,06$	
70	56	$\pm 1,05$	

При различных напряжениях больше энергии выделяется в разряд при полярности *WO+Cd-* (табл. 2.1), которая должна учитываться в компьютерной модели разряда.

Таблица 2.3 - Экспериментальные значения максимального тока разряда

$U_{\text{БП}}, \text{В}$	$\bar{x}, \text{А}$ (формула 2.4)	$\Delta, \text{А}$ (формула 2.8)	Примечание
<i>WO-Cd+</i>			
30	4,7	$\pm 0,257$	Типовые разряды (рис. 8, 9)
50	9,5	$\pm 0,261$	
70	14,3	$\pm 0,262$	
<i>WO+Cd-</i>			
30	5,1	$\pm 0,256$	Типовые разряды (рис. 10, 11)
50	10	$\pm 0,26$	
70	15,3	$\pm 0,262$	

В рамках данных исследований разрядов замыкания выявлено следующее. С точки зрения подсчета энергии, выделившейся в разряд (рисунок 2.7) и которая может потенциально воспламенить окружающую взрывоопасную газозвоздушную смесь, интерес представляют только *I* и *II* стадии процесса разряда - проявляется рост энергии до значения 0,318 мДж.

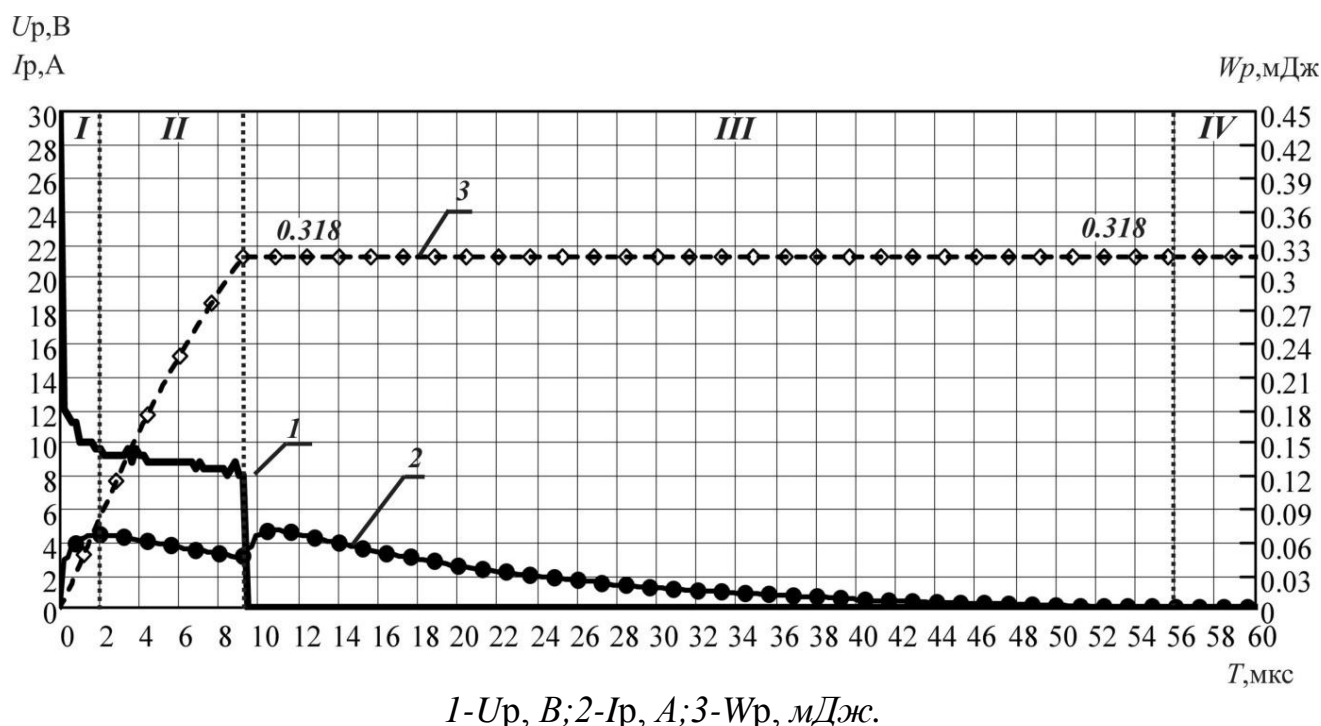


Рисунок 2.7 – Типовая зависимость напряжения разряда U_r , тока разряда I_r и энергии разряда W_r от времени при замыкании апериодической *RLC* цепи при следующих параметрах цепи: $U=30 \text{ В}$, $R_2=3,8 \text{ Ом}$, $L_1=2 \text{ мкГн}$, $C_1=4 \text{ мкФ}$, *WO+Cd-*

В течении *III* и соответственно *IV* стадии разряда энергия в разрядный промежуток не выделяется за счет металлического шунтирования искрового промежутка (стадия *III*) и полного разряда накопителя энергии - конденсатора (стадия *IV*). Процесс разряда условно можно разделить на 4 стадии (рисунок 2.7):

I – пробой, генерирование искры за счет тепловой ионизации. Резкое нарастание тока, резкое снижение напряжения до уровня анодно-катодного напряжения разряда.

II – поддержание искры за счет удержания уровня анодно-катодного напряжения разряда (дуговой разряд);

III – гашение искры за счет металлического замыкания;

IV – полный разряд конденсатора.

На рисунках 2.8 и 2.9 приведены экспериментальные зависимости напряжений разряда U_p и тока разряда I_p от времени при замыкании *RLC* цепи при разных скоростях V (2 м/с, 1 м/с, 0,5 м/с, 0,1 м/с) для полярности *WO+Cd-*.

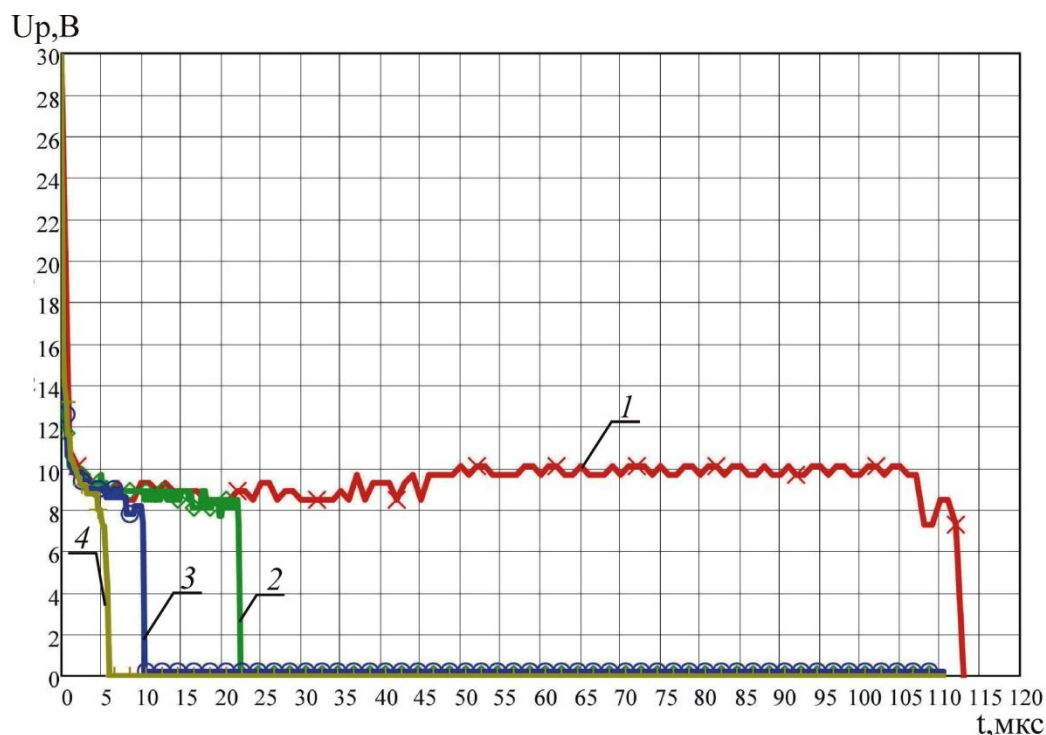


Рисунок 2.8– Типовая зависимость напряжения разряда U_p от времени при разных скоростях коммутации: 0,1 м/с (кривая 1); 0,5 м/с (кривая 2); 1 м/с (кривая 3), 2 м/с (кривая 4).

Во всех опытах поддерживались неизменные значения $R_2=3,8$ Ом, $L_1=2$ мкГн, $C_1=4$ мкФ, $U_{\text{БП}}=30$ В. Время достижения разряда III стадии T_0 (рисунок 2.8) обратно пропорционально скорости коммутации V . При больших скоростях коммутации (кривые 2-4, рисунок 2.8) ток разряда не достигает значения тока обрыва дуги (например, до $I_0=0.5$ А), а переходит в III стадию разряда (металлическое короткое замыкание).

Независимо от скорости коммутации, постоянная времени цепи $\tau=1/(R_2 \cdot C_1)$ остается неизменной, о чем свидетельствует наложение кривых I_p в процессе разряда (рисунок 2.9).

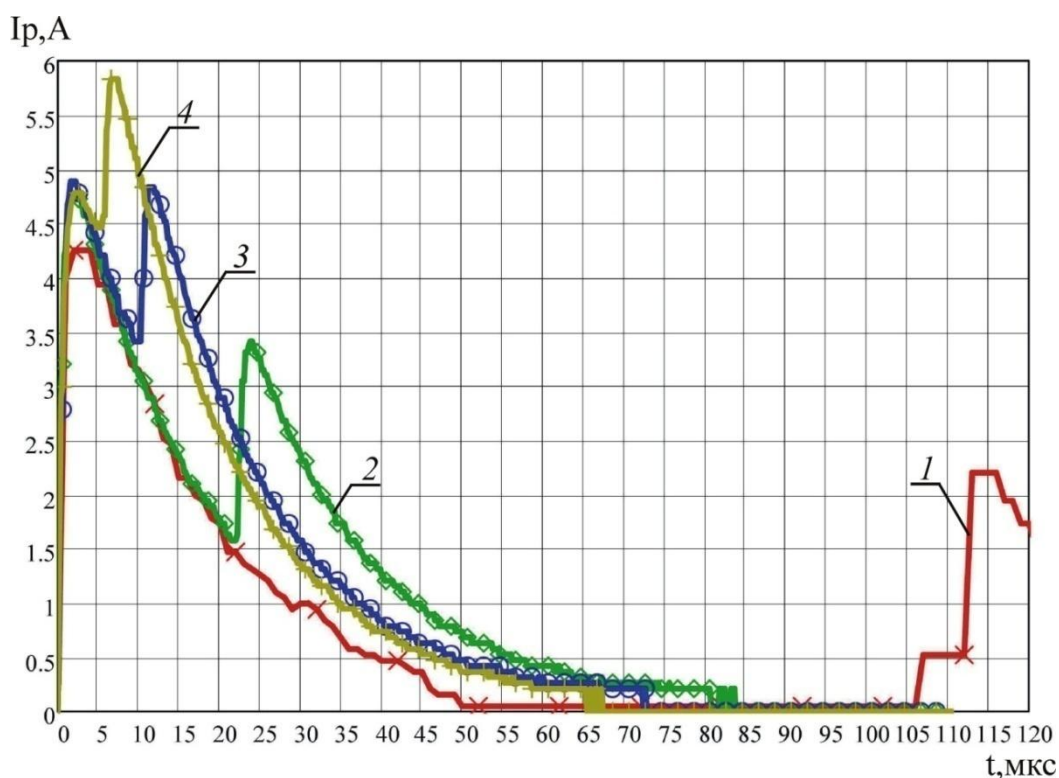


Рисунок 2.9– Типовая зависимость тока разряда I_p от времени при разных скоростях коммутации: 0,1 м/с (кривая 1); 0,5 м/с (кривая 2); 1 м/с (кривая 3), 2 м/с (кривая 4).

Расстояние l_0 между парой контактов ИМ, при котором происходит пробой и начинает формироваться электрический разряд [81]:

$$l_0 = V \cdot T_0, \quad \text{мм} \quad (2.12)$$

V – скорость замыкания контактов ИМ, мм/с, T_0 – длительности до наступления металлического короткого замыкания, с

По данным переходных процессов (рисунки 2.7, 2.8) в таблице 2.4 приведены значения энергии дугового разряда для стадий *I* и *II* (формула 2.1), длительности разряда T_p при токе обрыва дуги $I_0=0,5\text{А}$, длительности до наступления металлического короткого замыкания T_0 , полученных экспериментальным путем при разных скоростях замыкания V , а также расстояние l_0 между парой контактов ИМ, рассчитанное по формуле 2.12.

Таблица 2.4 - Расчетные и экспериментальные данные

V , м/с (V , мм/мкс)	T_p , мкс	l_0 , мм (формула 2.12)	W_p , мкДж	T_0 , мкс
0,1 (0,0001)	39	0,0112	720	112
0,5 (0,0005)	не достиг	0,0111	604	22,3
1 (0,001)	не достиг	0,0109	373	10,2
2 (0,002)	не достиг	0,0116	228	5,8

Из таблицы 2.4 видно, что значение расстояния пробоя l_0 не зависит от скорости замыкания, а определяется полярностью контактов и составляет 0,011 мм для полярности $WO+Cd$ -. Исходя из пробойной характеристики разрядов замыкания $U_{пр}=f(l_0)$ значение $l_0=0,011$ мм соответствует напряжению пробоя 11 В. Это объясняет стремительный спад напряжения разряда до уровня пробоя (рисунок 2.8) и достижение максимального значения тока разряда (рисунок 2.9).

Значения энергии разряда, рассчитанные для I и II стадии разряда, а также и длительности разряда максимальны при минимальной скорости замыкания.

При оценке искробезопасности емкостной цепи бескамерными методами, скорость замыкания V целесообразно выбирать из условия:

$$\frac{l_0}{1,1 \cdot T_p} \leq V, \quad \text{м/с} \quad (2.13)$$

где, l_0 - расстояние между парой контактов ИМ, м (принимается $11 \cdot 10^{-5}$ м);

T_p – расчетная длительность разряда (по формуле 2.14)

Длительность разряда для апериодического режима:

$$T_p = \frac{R_2 \cdot C_1}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{L_1}{C_1 \cdot R_2^2}}\right) \ln \left(\frac{E - 10}{I_0 \cdot R_2 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{L_1}{C_1 \cdot R_2^2}}\right)} \right) \cdot 10^6, \text{с} \quad (2.14)$$

2.2 Разработка уточненной компьютерной модели для оценки искробезопасности индуктивно-емкостных цепей

Анализ последних исследований и публикаций показал, что параметры, принятые в математической модели Бершадского И.А, как наиболее перспективной на сегодняшний день, не учитывают результаты экспериментальных исследований зависимости формирования напряжения на разряде от времени при различных напряжениях цепи. Вследствие чего выявлено расхождение значений параметров разряда (продолжительность, энергия разряда, максимальный ток), полученных при моделировании данным методом и путем эксперимента, которое достигает 16-20 %.

Основой данного расчетного метода оценки искробезопасности является математическая модель разряда замыкания.

Данная модель основана на постоянстве напряжения на разряде в установившемся режиме на уровне 11 В, экспоненциальном снижении напряжения разряда с начального до установившегося значения с постоянной времени 10^{-9} с.

В искробезопасности рассматриваются однократное замыкание и прерывистое искрение. Такие два вида искрообразования используются при испытании цепей с заряженными конденсаторами в индуктивно-емкостных цепях, являясь для них наиболее агрессивными в отношении воспламенения взрывчатых газовых смесей.

Экспериментально подтверждено, что для данных видов разряда можно принять одинаковую модель убывания тока. Процесс искрообразования при замыкании контактов включает в себя несколько этапов. При сближении электродов контактного механизма напряжение на нем соответствует напряжению источника питания цепи E . При соприкосновении контактов возникает ток разряда, вызывающий интенсивное испарение металла контактов и образование стримеров – узких проводящих (заполненных плазмой) каналов, исходящих от одного из электродов за период времени 0,1 мкс [82].

Соответственно, постоянная времени данного процесса τ составляет не более 33-34 нс. Данный процесс сопровождается снижением напряжения на разрядном промежутке по экспоненциальному закону от напряжения источника питания цепи E до установившегося значения U_0 . И остается неизменным на протяжении всего разряда $U_p = \text{const} = U_0$. Исчезновение дуги обуславливается снижением тока разряда до значения $I_p = I_0 < 250$ мА для однократных замыканий и 3...20 мА для прерывистого искрения. После чего наступает металлическое замыкание контактов - напряжение стремится к нулю.

Для обеспечения условия выделения в разряде за 0,1 мкс всей энергии, накопленной в конденсаторе, постоянная времени установления напряжения на разряде должна быть не более 10^{-9} с. Соответственно, при постоянной времени 33-34 нс, выделится примерно 94 % от всей энергии конденсатора.

Таким образом, в математической модели разряда замыкания значение постоянной времени соответствует условию выделения всей энергии конденсатора и учитывает время образования при пробое стримеров.

Для уточнения установившегося значения U_0 в данной модели проведены исследования экспериментальных зависимостей формирования напряжения на разряде от времени в омической цепи ($R_2=3,8$ Ом, $L_1=0$ мкГн, $C_1=0$ мкФ) - с целью исключения влияния емкости и индуктивности.

Поскольку уровень напряжения разряда не зависит от начального напряжения, исследования проводились при напряжении цепи 30 В с учетом рекомендуемой полярности $WO+Cd$ - с помощью ИМ (рисунок 2.1). Результаты исследований переходных процессов приведены в приложении Б.

На рисунке 2.10 представлены характерные экспериментальные зависимости напряжений разряда U_p от времени из записанных переходных процессов (приложение Б).

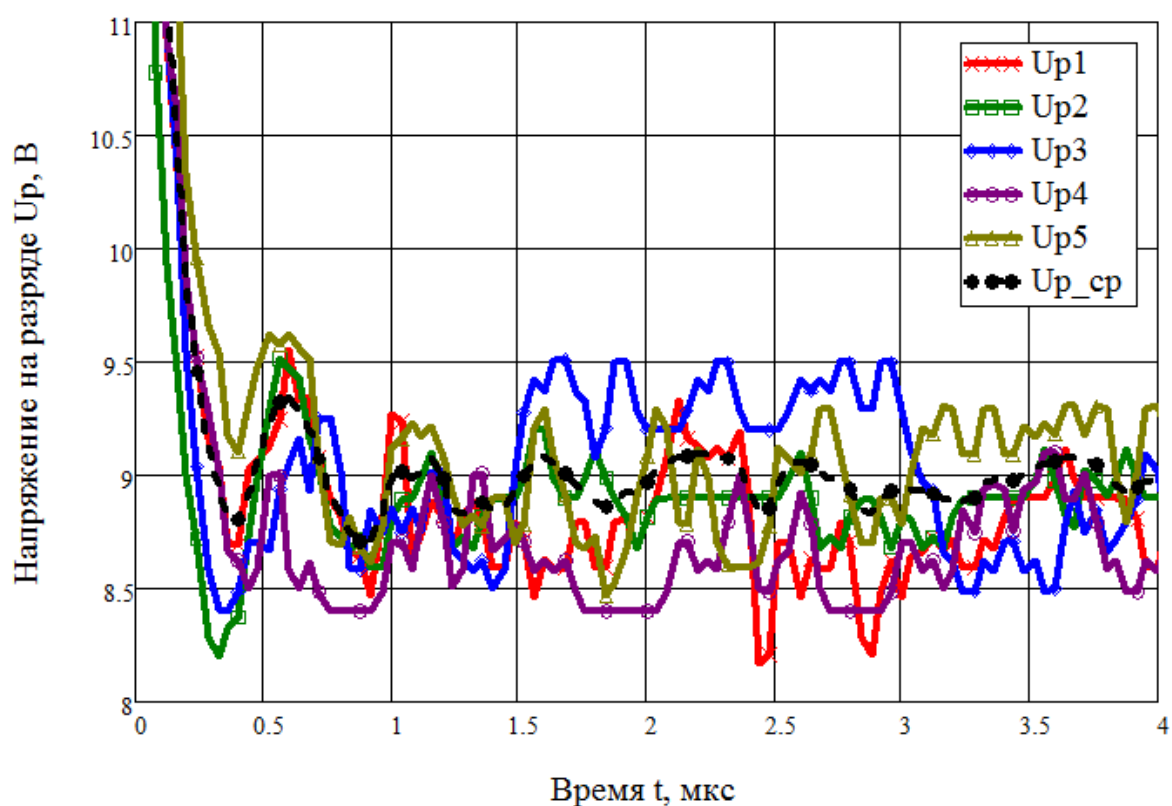


Рисунок 2.10 – Пять типовых зависимостей установившегося напряжения разряда U_p от времени в омической цепи при напряжении 30В и полярности $WO+Cd$ - .

С помощью пакета MathCAD рассчитаны и показаны на данном рисунке среднее значение данных зависимостей U_{p_cp} :

$$U_{p_cp_i} = \frac{U_{p1_i} + U_{p2_i} + U_{p3_i} + U_{p4_i} + U_{p5_i}}{5}, \text{ В} \quad (2.15)$$

где $U_{p_cp_i}$ – среднее значение напряжения на разряде, В; i – номер значения в массивах данных в диапазоне от 1 до N ; N – общее количество значений в массивах; $U_{p1_i} - U_{p5_i}$ – мгновенные значения напряжений на разряде, В.

В таблице 2.5 приведены расчетные (по формулам 2.4-2.9) усредненные значения установившегося напряжения разряда U_0 переходных процессов разрядов замыкания всей выборки (приложение Б).

Таблица 2.5 - Экспериментальные значения установившегося напряжения разряда U_0

$\bar{x}, \text{ В}$ (формула 2.4)	$\Delta, \text{ В}$ (формула 2.8)	Примечание
<i>WO+Cd-</i>		
8,98	±0,514	Типовые разряды (рисунок 2.10)

Анализ зависимостей (рисунок 2.10) дает основание предполагать, что изменение напряжения разряда во времени подчиняется экспоненциальному закону:

$$U_p(T) = ae^{bT} + c. \quad (2.16)$$

С помощью встроенных функций пакета MathCAD массив усредненных значений напряжения на разряде U_{p_cp} , аппроксимирован с помощью экспоненциальной регрессии вида (2.16).

Найдены коэффициенты аппроксимации: $a=21$ В; $b= -34$ мкс; $c=9$ В и оценен коэффициент корреляции: 0,97. Листинг программы приведен на рисунке 2.11.

Таким образом, уравнение, описывающее переходной процесс изменения напряжения на разряде $U_p(t)$ включая описанные этапы возникновения разряда замыкания:

$$U_p(t) = (E - U_0)e^{-t/\tau} + U_0. \quad (2.17)$$

где E – напряжение цепи, В; U_0 – значение установившегося напряжения разряда (соответствует коэффициенту c аппроксимации 2.16), В, t – время, с, τ – постоянная времени (соответствует отношению $1/b = 1/34$ мкс=29 нс).

Экспоненциальная регрессия $f(x) = a \cdot e^{bx} + c$:

$$S := \text{expfit} \left[T, U_{p_cp}, \begin{pmatrix} 21 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \right]$$

Нахождение коэффициентов a , b , c :

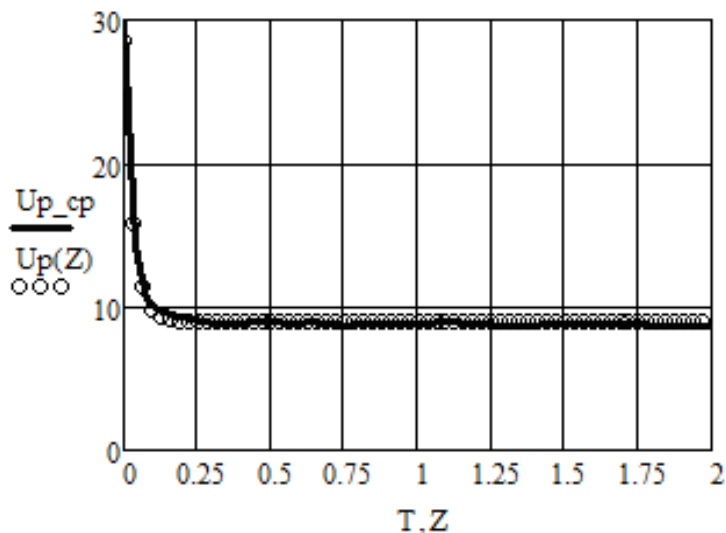
$$S = \begin{pmatrix} 20.98 \\ -33.97 \\ 8.99 \end{pmatrix}$$

Полученная функция:

$$U_p(T) := 21 \cdot e^{-34T} + 9$$

Формирование массива времени с шагом, меньшим, чем для массива T :

$$Z := \frac{\max(T) - \min(T)}{10000}, 0.01 .. \max(T)$$



Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$\text{corr}(U_p(T), U_{p_cp}) = 0.97$$

Рисунок 2.11 – Листинг программы аппроксимации напряжения на разряде с помощью экспоненциальной регрессии.

Представить искробезопасный механизм в виде математической (компьютерной) модели в пакете MicroCAP-12 [83, 84], отражающей характеристики разряда емкостной цепи (2.17) удобно через сопротивление разряда (рисунок 2.12):

$$R_p(t) = \frac{U_p(t)}{I_p(t)} = \frac{(E - U_0)e^{-t/\tau} + U_0}{I_p(t)} = \frac{(E - 9)e^{-t \cdot 10^9/29} + 9}{I_p(t)}. \quad (2.18)$$

где $R_p(t)$ – мгновенное значение сопротивления разряда, Ом; E – напряжение цепи, В; $I_p(t)$ – мгновенное значение тока в разряде, А; t – время, с, τ – постоянная времени.

```
.DEFINE i_br 3m
.DEFINE PD if(abs(I(R0))<i_br OR T<c_br,0,(I(R0))*V(SM))
.DEFINE Wr SD(PD)
.DEFINE c_br 10u
.MODEL S1 VSWITCH (ROFF=10MEG RON=0.001)
```

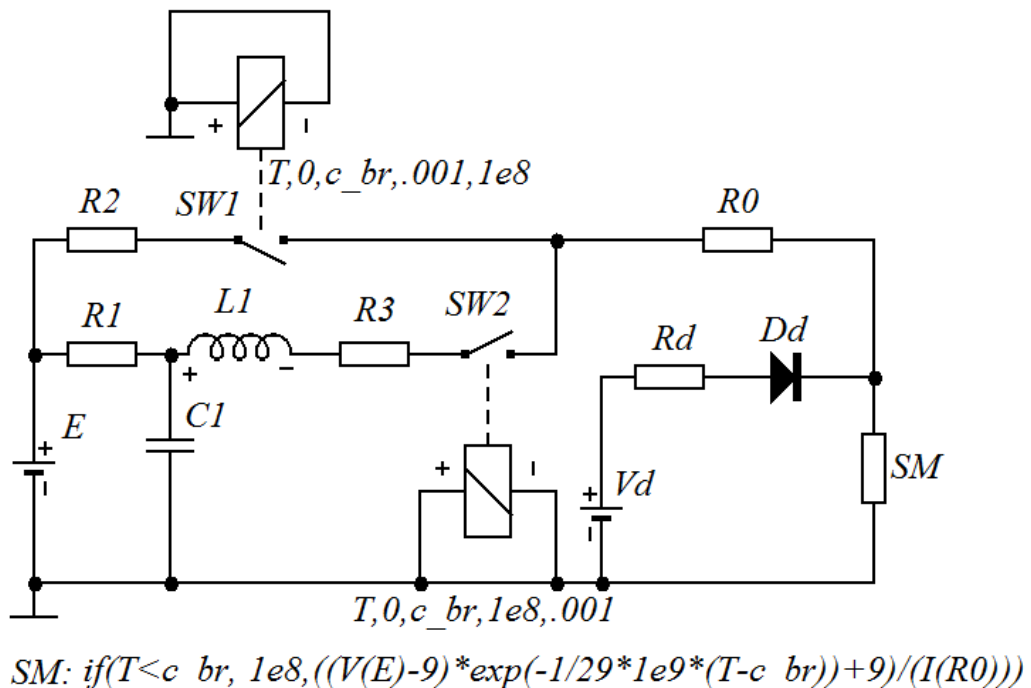


Рисунок 2.12 – Схема компьютерной модели расчета параметров разряда искробезопасной индуктивно-емкостной цепи.

Ключ $SW2$ обеспечивает запуск переходных процессов разряда.

В исходном состоянии разомкнут, что обеспечивает заряд конденсатора $C1$ до напряжения источника питания E . Переходный процесс запускается в момент замыкания ключа (через 10 мкс).

Дополнительная цепочка Vd, Rd, Dd задает предварительный ток через разряд и моделирует возникновение в нем автоэлектронной эмиссии.

Резисторы $R1, R2$ исключают влияние источника питания на параметры разряда путем ограничения тока до 2 мА.

Ключ $SW1$ в исходном состоянии замкнут, что обеспечивает наличие напряжения холостого хода источника питания E на искрообразующем механизме перед запуском переходного процесса.

Резистор $R0=0.1$ Ом определяет сопротивление проводов, выводов элементов и т.д.

Модель SM показывает изменение во времени сопротивления разрядного промежутка (2.18), которое, в свою очередь, зависит от параметров разрядного контура.

Исследуемая индуктивно-емкостная цепь состоит из конденсатора $C1$, резистора $R3$ и индуктивности $L1$.

Компьютерная модель (рисунок 2.12) является основой для получения методом моделирования процесса дуговой коммутации в индуктивно-емкостных электрических цепях исходных данных для их оценки: энергии разряда $W_p(T_p)$, длительности разряда T_p .

Расчет времени разряда рекомендуется определять как относительное время всплеска кривой тока разряда $I(SM)$ между началом ее роста и величиной тока обрыва разряда $I(t)=I_0=3$ мА (рисунок 2.13). Энергия разряда определяется графически при значении текущего времени, соответствующем длительности разряда.

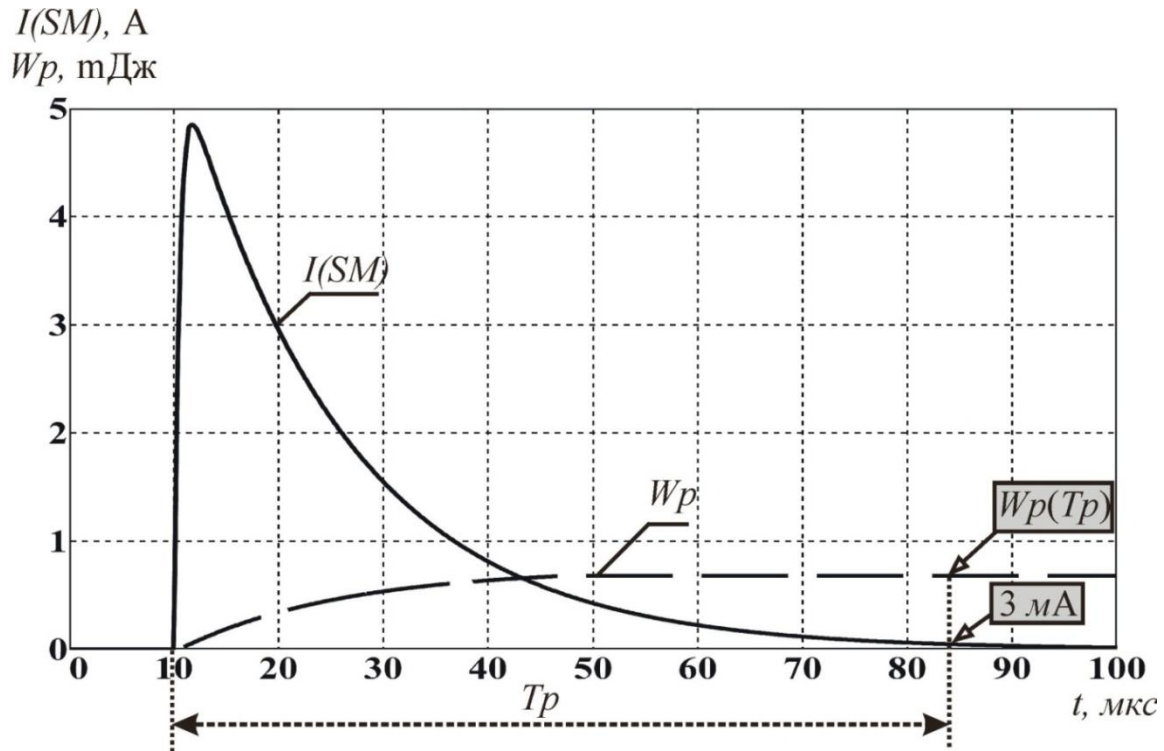


Рисунок 2.13 – Зависимости основных параметров разряда замыкания от времени.

Правомерность использования усовершенствованной математической модели доказывается сопоставлением расчетных и экспериментальных значений энергии разряда W_p , продолжительности разряда T_p и максимального тока разряда I_{\max} при токе обрыва искры 0,5 А и $R_3=3,8$ Ом (табл. 2.6).

Таблица 2.6. Расчетные и экспериментальные данные разряда

$E, В$	$C1, мкФ$	$L1, мкГн$	Экспериментальные кривые			Уточненная модель			Модель [45]		
			$W, мкДж$	$T_p, мкс$	$I_{\max}, А$	$W, мкДж$	$T_p, мкс$	$I_{\max}, А$	$W, мкДж$	$T_p, мкс$	$I_{\max}, А$
30	4	0	715	39	5,1	680	38	5,3	745	36	4,8
50	4	0	1430	49	10	1397	48,3	10,4	1619	47,5	9,8
70	4	0	2150	55	15,3	2117	54,7	15,4	2493	54	14,8
30	4	2	680	39	5	680	37,6	4,9	748	35,9	4,4
50	4	2	1428	49,3	9,2	1390	47,8	9,4	1623	47	8,9
70	4	2	2150	55	14	2100	54	14	2498	53,4	13,5

Экспериментальные данные получены на унифицированном искрообразующем механизме путем фиксации переходных процессов тока и напряжения разряда цифровым осциллографом TDS2022.

Сходимость результатов моделирования по отношению к экспериментальным данным составляет не более 5% (таблица 2.6), что характеризует данную модель как сравнительно точную.

2.3 Определение минимально-воспламеняющих параметров разряда индуктивно-емкостной цепи рудничного взрывозащищенного электрооборудования

Исследования воспламеняющей способности емкостных цепей с ограничительным резистором в разрядной цепи по данным IEC 60079-11:2011 дали предпосылки для определения расчетной зависимости минимальной воспламеняющей (допустимой) энергии от времени разряда в емкостной и индуктивно-емкостной цепи для группы I.

Согласно графикам зависимостей минимального воспламеняющего напряжения от емкости цепи для группы I определены значения параметров электрической цепи: сопротивления токоограничительного резистора R , Ом и емкости C , мкФ при напряжениях цепи $E=20$ В, 30 В, 50 В, 70 В, 100 В, 200 В, 300В.

С помощью компьютерной модели (рисунок 2.12) при $L1=0$, токе обрыва дуги 3 мА рассчитаны значения энергии разряда W_v и его продолжительности T_p для данных емкостных цепей (таблица 2.7, рисунок 2.14).

Таблица 2.7. Результаты моделирования воспламеняющих параметров.

Параметры цепи			Параметры разряда		Параметры цепи			Параметры разряда	
E , В	$R3$, Ом	$C1$, мкФ	T_p , мс	W_B , мДж	E , В	$R3$, Ом	$C1$, мкФ	T_p , мс	W_B , мДж
20	0	24	0.0466	2.372	100	0	0.68	0.0005	0.736
20	5.6	200	7.510	19.7	100	5.6	2.5	0.124	2.044
30	0	7.2	0.0147	1.361	100	15	4.7	0.546	3.816
30	5.6	28	1.157	5.255	100	40	9	2.407	7.292
30	15	90	8.427	16.869	200	0	0.22	0.0003	0.997
50	0	2.4	0.005	0.922	200	5.6	0.8	0.043	1.442
50	5.6	9	0.407	3.295	200	15	1.5	0.190	2.583
50	15	18	1.869	6.579	200	40	2.7	0.803	4.602
50	40	60	14.128	21.892	300	0	0.12	0.0001	1.195
70	0	1,3	0.0025	0.801	300	5.6	0.43	0.0237	1.288
70	5.6	4,9	0.232	2.672	300	15	0.75	0.1	2.022
70	15	8,6	0.945	4.677	300	40	1.5	0.472	3.915
70	40	22	5.532	11.945					

Для массивов полученных данных W_B и T_p (таблица 2.7) найдены аналитические зависимости $W_B(T_p)$ путем аппроксимации с помощью наиболее подходящих регрессионных уравнений (Приложение В).

Для напряжений E : 20-50 В

$$W_B(T_p) = a_{20_50}(E) \cdot \ln(T_p) + b_{20_50}(E) \cdot \sqrt{T_p} + c_{20_50}(E) \cdot T_p. \quad (2.19)$$

Для напряжений E : 50-100 В

$$W_B(T_p) = a_{50_100}(E) \cdot \ln(T_p) + b_{50_100}(E) \cdot \sqrt{T_p} + c_{50_100}(E) \cdot T_p + d_{50_100}(E). \quad (2.20)$$

Для напряжений E : 100 – 300 В

$$W_B(T_p) = a_{100_300}(E) \cdot \ln(T_p) + b_{100_300}(E) \cdot \sqrt{T_p} + c_{100_300}(E). \quad (2.21)$$

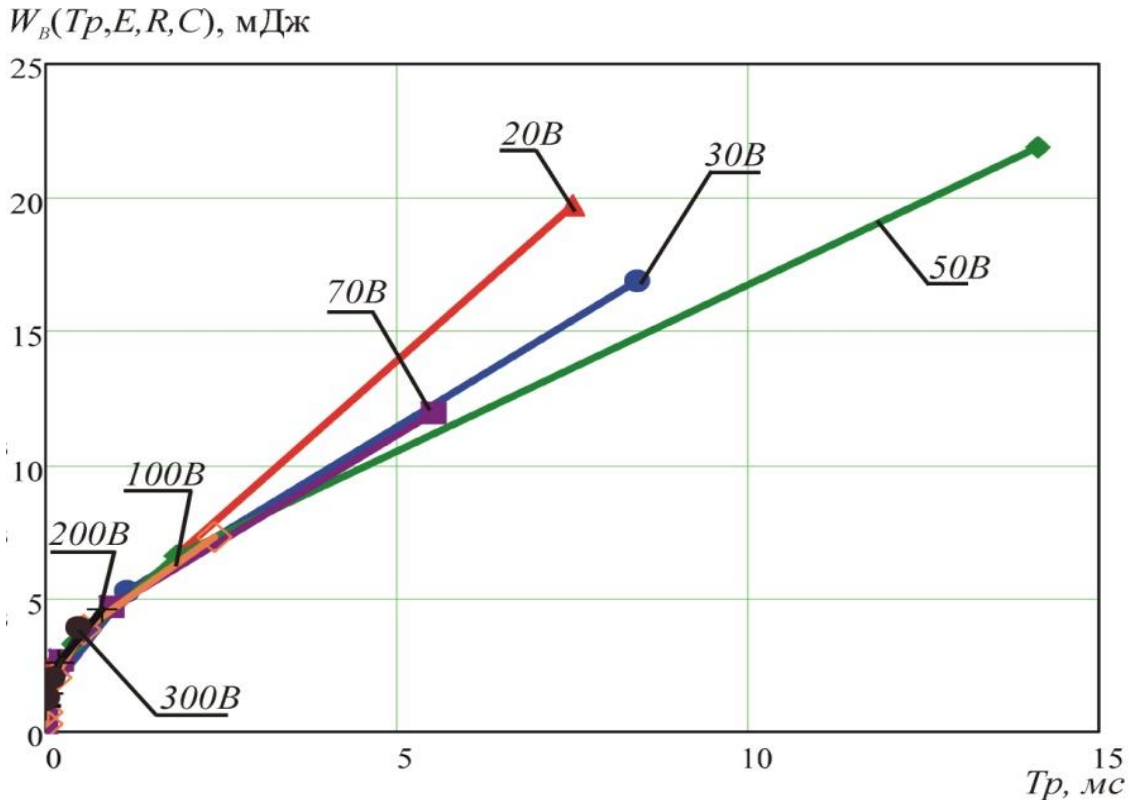


Рисунок 2.14 – Результаты моделирования воспламеняющих параметров по данным таблицы 2.7.

Для каждого напряжения E найдены коэффициенты аппроксимации и оценен коэффициент корреляции. Точность аппроксимации (коэффициент корреляции) во всех случаях составляет 1.

Для групп массивов полученных коэффициентов, определяемых диапазоном напряжений 20-50В, 50-100В и 100-300В, найдены их аналитические зависимости путем аппроксимации с помощью наиболее подходящих регрессионных уравнений и коэффициенты аппроксимации. Точность аппроксимации (коэффициент корреляции) для всех уравнений составляет 1.

Полученные уравнения регрессии и их коэффициенты для взрывоопасных смесей группы I, связывающие минимальную воспламеняющую энергию, время разряда и напряжение емкостной цепи приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Воспламеняющие энергии W_B (мДж) группы I в зависимости от напряжения емкостной цепи E (В) и времени разряда замыкания T_p (мс)

$E, В$	Значения коэффициентов уравнения регрессии
20-50	$a_{20_50}(E) = 5.46 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(E) - 1.59 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{E} - 1.07 \cdot 10^{-3}$
	$b_{20_50}(E) = -0.28 \cdot \ln(E) + 0.09 \cdot \sqrt{E} + 0.53$
	$c_{20_50}(E) = -1.97 \cdot \ln(E) + 0.48 \cdot \sqrt{E} + 4.76$
	$W_B(T_p, E) = a_{20_50}(E) \cdot \ln(T_p) + b_{20_50}(E) \cdot \sqrt{T_p} + c_{20_50}(E) \cdot T_p$
50-100	$a_{50_100}(E) = 3.35 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(E) - 8.48 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{E} - 7.03 \cdot 10^{-3}$
	$b_{50_100}(E) = -1.4 \cdot \ln(E) + 0.36 \cdot \sqrt{E} + 3.07$
	$c_{50_100}(E) = 17.93 \cdot \ln(E) - 4.59 \cdot \sqrt{E} - 37.04$
	$d_{50_100}(E) = 0.04 \cdot \ln(E) - 8.79 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{E} - 0.07$
	$W_B(T_p, E) = a_{50_100}(E) \cdot \ln(T_p) + b_{50_100}(E) \cdot \sqrt{T_p} + c_{50_100}(E) \cdot T_p + d_{50_100}(E)$
100-300	$a_{100_300}(E) = -1.06 \cdot 10^{-5} \cdot \ln(E) - 5.62 \cdot 10^{-7} \cdot E + 8.83 \cdot 10^{-5}$
	$b_{100_300}(E) = -0.042 \cdot \ln(E) + 4.39 \cdot 10^{-4} \cdot E + 0.29$
	$c_{100_300}(E) = 2.83 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(E) - 8.93 \cdot 10^{-6} \cdot E - 1.74 \cdot 10^{-5}$
	$W_B(T_p, E) = a_{100_300}(E) \cdot \ln(T_p) + b_{100_300}(E) \cdot \sqrt{T_p} + c_{100_300}(E)$

Рассмотрим методику оценки искробезопасности простых емкостных цепей группы I по разрядам замыкания на примере схемы рисунок 2.12 с параметрами $E=40$ В, $R3=5,6$ Ом и $C1=12$ мкФ, 13,5 мкФ и 15 мкФ.

Зависимость допустимой воспламеняющей энергии от времени $W_B(T_p)$ разряда для $E=60$ В (с учетом коэффициента запаса $1.5 \cdot E$) приведен на рисунке 2.15.

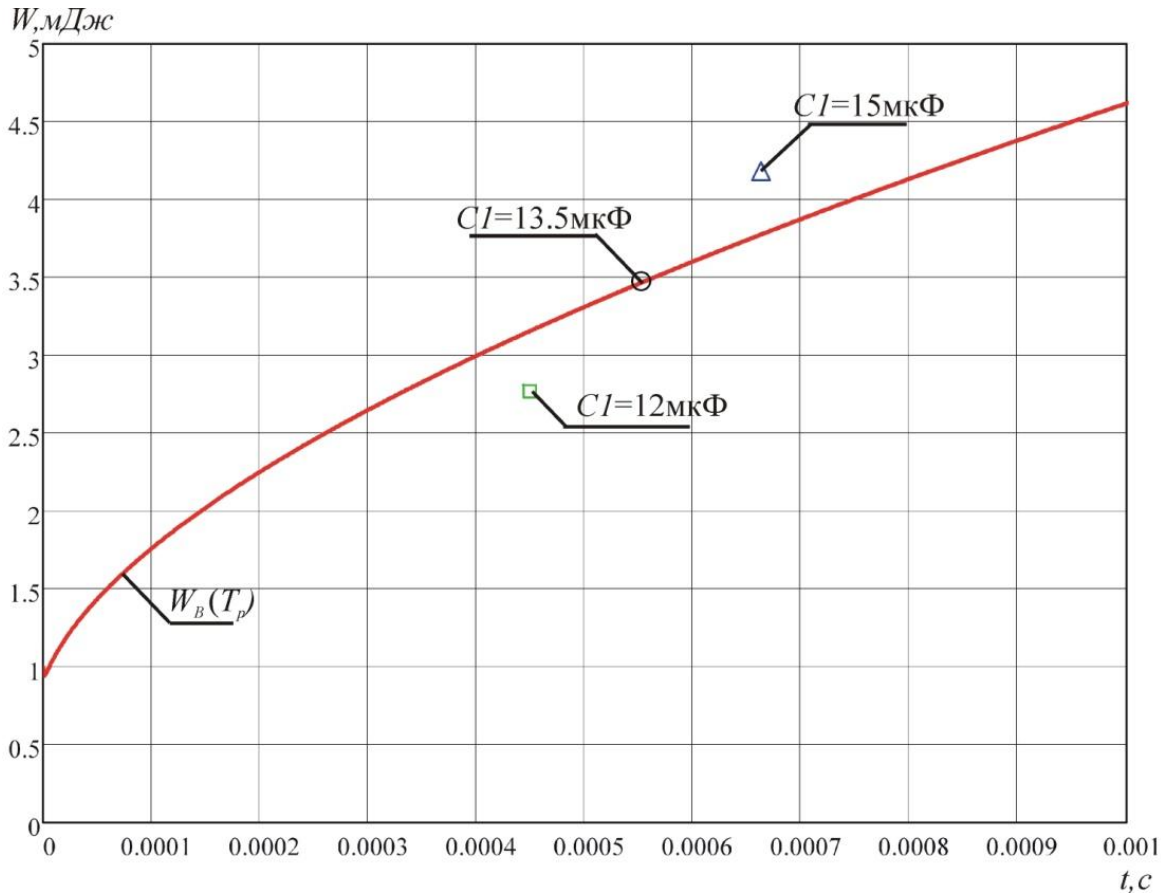


Рисунок 2.15 – Зависимость допустимой воспламеняющей энергии (сплошная линия) и энергии, выделившейся в разряд, от времени

На рисунке 2.15 показаны расчетные точки для емкостей $C1=12$ мкФ, $C1=13.5$ мкФ, $C1=15$ мкФ соответственно. Для трех значений емкостей, условие соблюдения искробезопасности (расчетная точка ниже кривой допустимой воспламеняющей энергии от времени $W_B(T_p)$) выполняется только для 12 мкФ и 13,5 мкФ.

Согласно кривым ИЕС 60079-11:2011 для указанных параметров $E=40$ В допустимая емкость не превышает 15 мкФ.

В результате анализа было выявлено, что расхождение между полученными данными и IEC 60079-11:2011 составляет:

$$\sigma = \frac{15 - 13,5}{15} \cdot 100 = 10\% \quad (2.22)$$

Аналогичные исследования оценки достоверности расчетных значений конденсатора $C1$ с помощью уравнений регрессии (таблица 2.8) и значений согласно экспериментальным кривым IEC 60079-11:2011 приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 - Сравнение результатов расчета $C1_p$ и эксперимента $C1_e$, простых емкостных цепей

$E, В$	$R3, Ом$	$C1_p, мкФ$	$C1_e, мкФ$ по [14, 24]	Погрешность $\delta, \%$
25	0	12	11,5	4,3
25	5.6	55	59	6,7
40	0	3,5	3,9	10,2
40	5.6	13,5	15	10
40	15	31	33	6,1
60	0	1,55	1,7	8,8
60	5.6	6	6,5	7,6
60	15	12	13	7,7
85	0	0,82	0,9	8,9
85	5.6	3,2	3,5	8,6
85	15	5,9	6,2	4,8
150	0	0,32	0,35	8,6
150	5,6	1,4	1,5	6,7
150	15	2,33	2,5	6,8
250	0	0,155	0,17	8,8
250	5,6	0,57	0,6	5
250	15	1,13	1,2	5,8

Проведем исследования оценки достоверности расчетных значений допустимых параметров искробезопасных цепей источников питания с нелинейной вольтамперной характеристикой со значениями, полученными при испытании с помощью искрообразующего механизма.

Опасность подключения емкостной нагрузки к источнику питания ИПИ-24-3 тестировалась согласно расчетной модели (рисунок 2.16).

Ключ SW2 в исходном состоянии разомкнут, что обеспечивает заряд конденсатора C1 до напряжения источника питания $1,5 \times E$. Переходный процесс запускается в момент замыкания ключа (10 мкс на рисунке 2.17).

Дополнительная цепочка VD, Rd, Dd задает предварительный ток через разряд и моделирует возникновение в нем автоэлектронной (фотоэлектронной) эмиссии. Начальное напряжение на разряде уменьшается от значения $1,5 \times E$ до установившегося напряжения $U_p = 9$ В по экспоненте с постоянной времени 29^{-9} с. Модель SM задает изменение во времени сопротивления разрядного промежутка, которое, в свою очередь, зависит от параметров разрядного контура.

Безопасная емкость C1 (таблица 2.10) при закорачивании ее через сопротивление $R3 = 0,1$ Ом определялась с учетом тока обрыва 20 мА. Аналогичным образом определены значения безопасной емкости для аналогичных по принципу работы источников питания АГАТ ВН-24.30, БПИ-660/24 (таблица 2.10).

Таблица 2.10 - Результаты оценки ИБ источников ИПИ, АГАТ, БПИ

Тип источника	Напряжение х.х, В (с учетом коэффициента запаса 1,5)	Максимально допустимая внешняя емкость C1, мкФ	
		Метод БТО	Эксперимент
ИПИ-24-3	39,9	2	2,1
АГАТ ВН-24.30	37,5	1,43	1,5
БПИ-660/24	42	1,15	1,2

Погрешность результатов расчета граничных значений емкости данным методом для источников питания с динамической защитой и испытаний с помощью искрообразующего механизма не превышает 4,7 %.

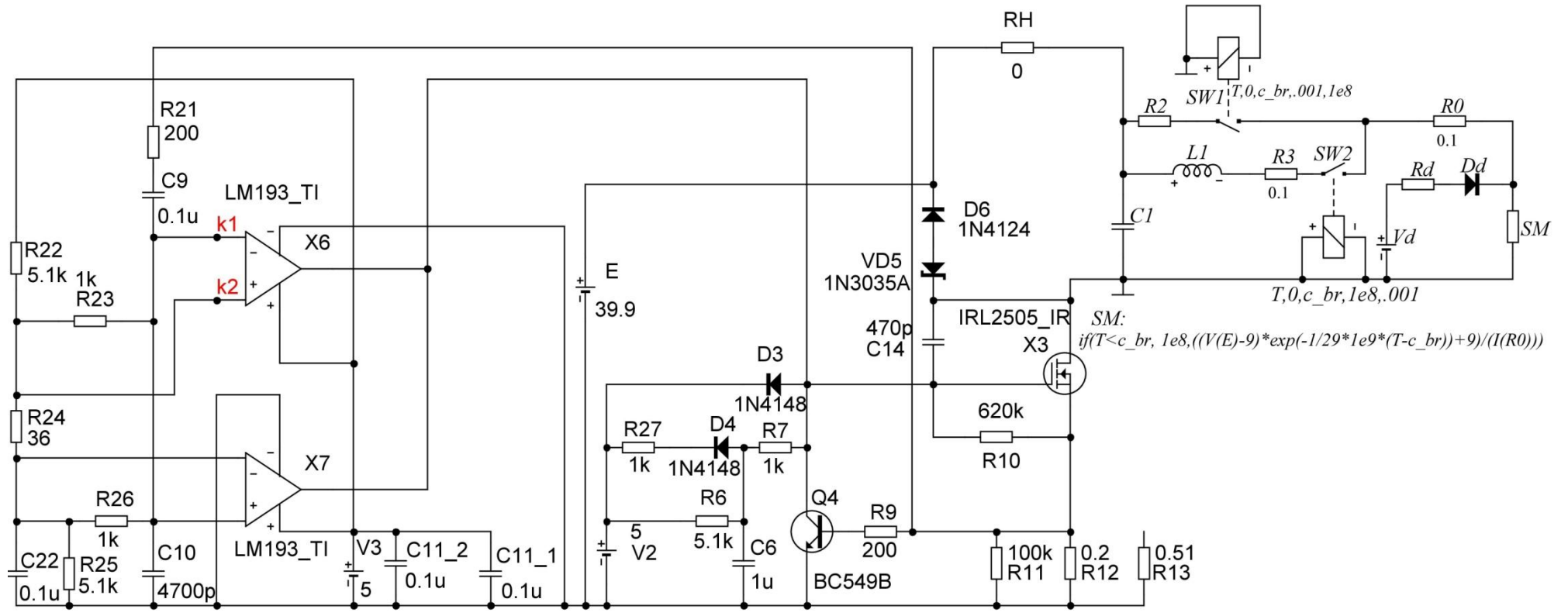


Рисунок 2.16 – Схема расчетная по разрядам замыкания блока питания типа ИПИ-24-3

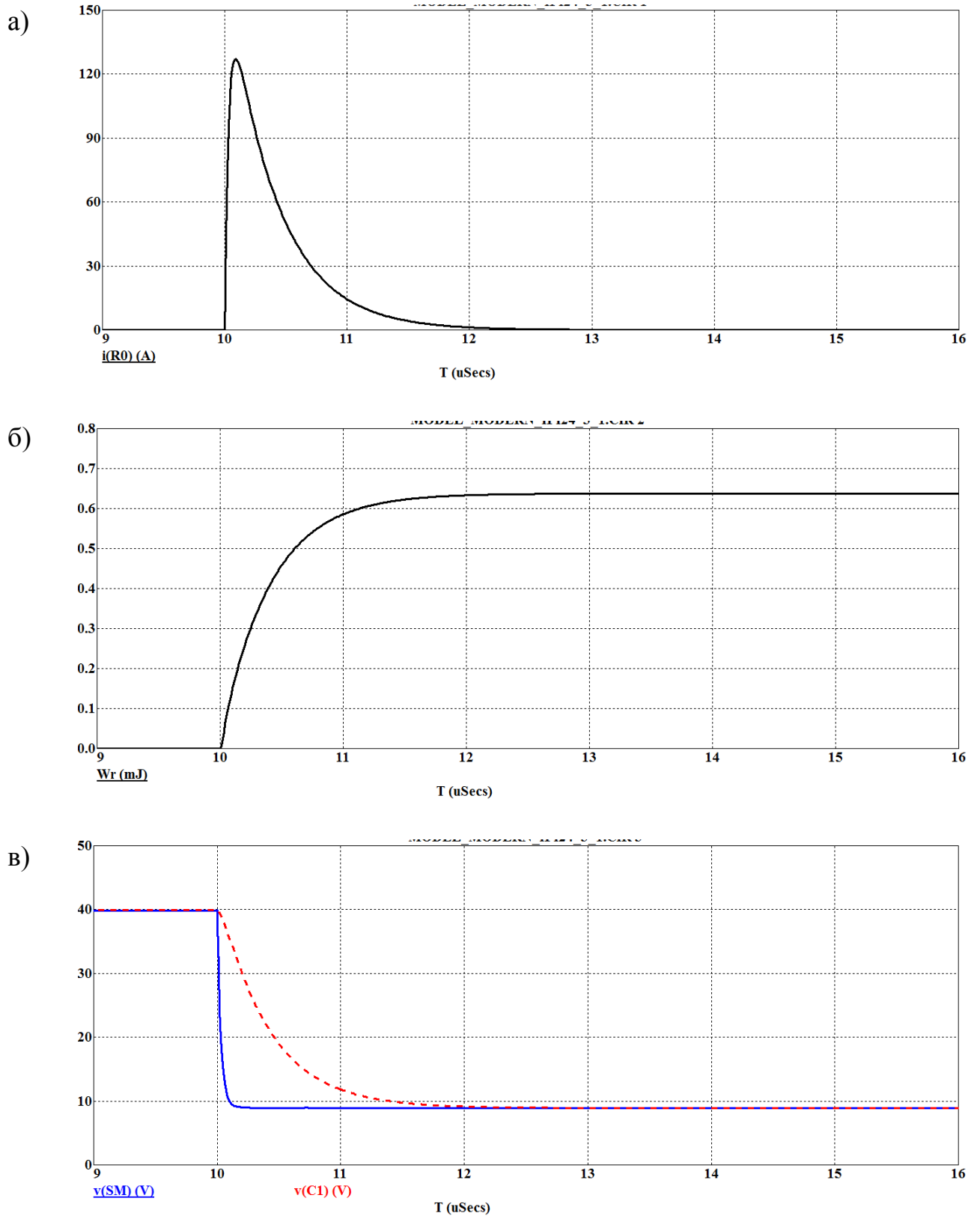


Рисунок 2.17 – Зависимость тока разряда (а), энергии разряда (б), напряжения разряда $v(SM)$ и на конденсаторе $v(C1)$ (в) от времени при замыкании через резистор $R3$

2.4 Обоснование методики бескамерной оценки искробезопасности сложных индуктивно-емкостных цепей

Основой предложенной методики оценки искробезопасности сложных индуктивно-емкостных цепей служат результаты, полученные в п. 2.3.

1. В среде программирования Micro-Cap-12 собрать исследуемую электрическую цепь. К ней подключить модель разряда замыкания (рисунок 2.18).

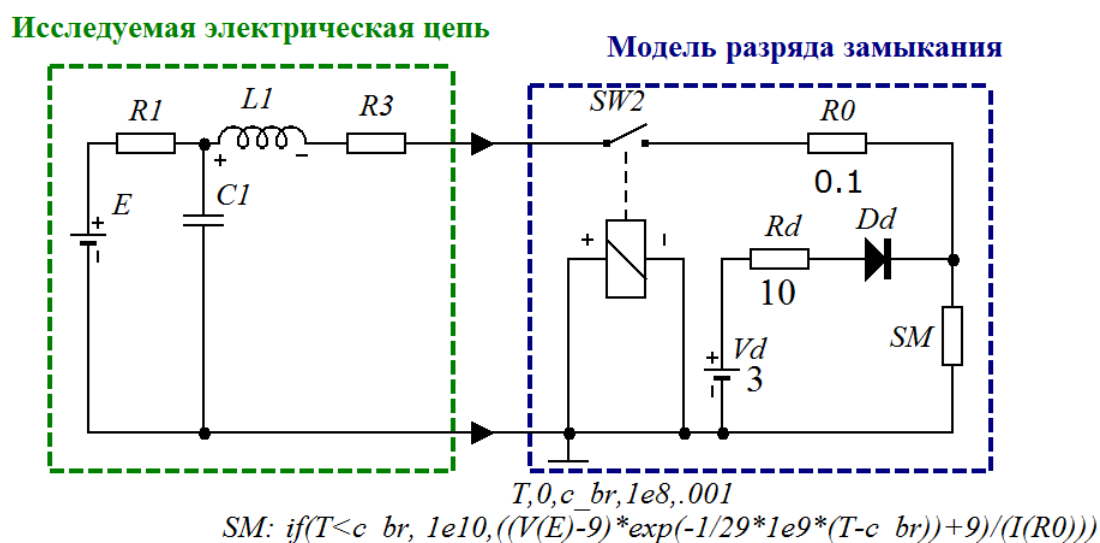


Рисунок 2.18 – Моделирование разряда замыкания в среде Micro-Cap-12

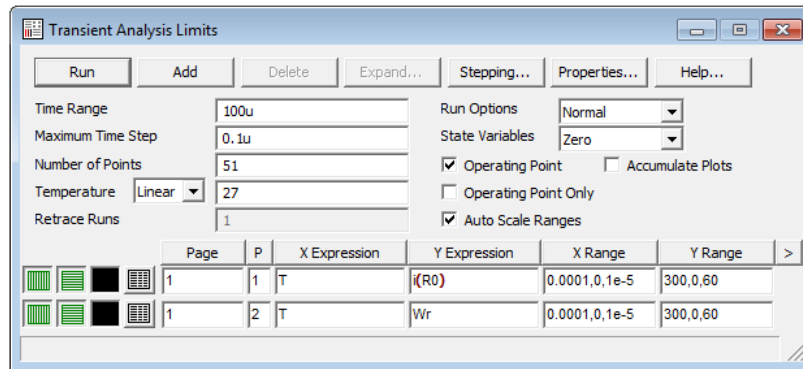
Емкость конденсатора $C1$, напряжение источника питания E , сопротивление $R3$ и индуктивность $L1$ задаются пользователем в зависимости от исходных данных оцениваемой сложной индуктивно-емкостной цепи. Параметры VD , Rd , Dd задают предварительный ток через разряд и моделируют возникновение в нем автоэлектронной эмиссии.

2. В текстовой части среды программирования Micro-Cap-12 необходимо произвести настройки:

- задержки запуска переходного процесса (момент замыкания ключа $SW2$) «.DEFINEC_br 10u»;
- значения тока обрыва дуги I_0 «.DEFINEi_br 3m»;
- условия расчета мощности разряда «.DEFINE PD if(abs(I(R0)) < i_br OR T < c_br, 0, (I(R0)) * V(SM))»;

- расчет энергии разряда «.DEFINE Wr SD(PD)»;
- начальные условия напряжения разряда «.IC V(SM)=0.01».

3. Вывести переходные процессы тока разряда $I(R0)$ и энергии разряда Wr от времени T :



4. Исходя из анализа переходных процессов в схеме, определяем продолжительность разряда T_p и энергию разряда W_p при токе обрыва $I_0=I(R0)=3$ мА (рисунок 2.13).

3. Полученные значения W_p и T_p наносим на поле кривой допустимой воспламеняющей энергии от времени $W_B(T)$, которая отвечает напряжению цепи (таблица 2.8) после чего оценить полученные результаты с точки зрения искробезопасности:

а) если точка $W_p(T_p)$ проходит выше кривой, то такие значения исходных параметров в схеме являются взрывоопасными;

б) если точка $W_p(T_p)$ проходит непосредственно по кривой или ниже ее, то такие значения исходных параметров в схеме являются взрывобезопасными.

Если моделирование переходных процессов произведено с учетом коэффициента запаса искробезопасности 1,5 по напряжению источника питания ($1,5 \cdot E$), то кривая $W_B(T)$ должна соответствовать напряжению цепи E . И наоборот, при моделировании переходных процессов без учета коэффициента запаса искробезопасности по напряжению источника питания E , кривая $W_B(T)$ должна соответствовать напряжению цепи $1,5 \cdot E$.

Данная методика допускает определение значений W_p и T_p экспериментальным путем (с помощью макета или образца) – по переходным

процессам напряжения разряда и тока разряда, снятым по схеме (рисунок 2.2) посредством запоминающего осциллографа. При этом расчет W_p рекомендуется выполнять по формуле 2.1 при условии $I_p \geq I_0$. После чего выполнить п.3 данной методики.

2.5 Выводы

1. По результатам экспериментальных исследований установлено, что:

- величина установившегося напряжения на разряде (при положительной полярности на вольфрамовом электроде $8,99 \pm 0,512$ В, а при отрицательной – $9,3 \pm 0,8$ В) определяется материалом контактирующих пар и не зависит от начального напряжения цепи;

- независимо от напряжения цепи больше энергии выделяется в разряд при сочетании приложенного напряжения к контактирующей паре: вольфрам – анод, кадмий – катод, которая должна учитываться в компьютерной модели разряда.

- для указанной полярности постоянная времени величины напряжения на разряде составляет 29 нс и не зависит от начального напряжения цепи.

Это позволило уточнить математическую модель дугового разряда в индуктивно-емкостных цепях, обеспечивающую погрешность результатов моделирования и экспериментальных данных не более 5%.

2. Определены и предложены уравнения расчета минимальной воспламеняющей энергии, выделяемой в разряд при замыкании емкостной цепи постоянного тока и их коэффициентов, позволяющие определить граничные условия поджигания метановоздушной смеси во всем диапазоне длительности разряда от 0,1 мкс до 14 мс и напряжения цепи от 20 до 300 В, при этом не прибегая к аппроксимации по 3-м ближайшим напряжениям с фиксированной длительностью разряда.

3. Предложен усовершенствованный метод расчетной оценки искробезопасности сложных емкостных, а также индуктивно-емкостных цепей, позволяющий производить оценку источников питания с динамической защитой с погрешностью не более 4,7 % от оценок, полученных с помощью испытательных камер.

ГЛАВА 3

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОЦЕНКИ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ РАЗРЯДОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАЗМЫКАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТОЙ

3.1. Разработка уточненной компьютерной модели для оценки искробезопасности индуктивно-резистивных цепей

Анализ характеристик искробезопасных источников питания (п.1.3) показал, что эффективное достижение данной искробезопасной мощности возможно при реализации в них принципа искусственного сокращения длительности электрического разряда, возникающего при коммутации цепи (динамическая защита).

Выявленные недостатки (п.1.2) известных в настоящее время расчетных и экспериментальных методов оценки искробезопасности сводятся к очень низкой достоверности результатов при оценке источников питания с динамической защитой. Исключением является метод расчетной оценки искробезопасности, базирующийся на компьютерном моделировании процесса дуговой коммутации в электрических цепях.

В работах Бершадского И.А. продемонстрирована возможность использования расчетного метода для оценки источников питания с динамической защитой, а также резистивных и индуктивных цепей. При этом расхождение расчетных предельных искробезопасных параметров с данными экспериментальных испытаний составляет от 3 до 14%.

Компьютерная модель данного метода-прототипа основана на уравнении Майра (3.1), характеризующее ток, напряжение, проводимость разряда и учитывает динамическую вольтамперную характеристику дуги, скорость

коммутации, тепловую постоянную инерции дуги τ (с учетом динамических свойств плазмы разряда), баланс отводимой и поступающей мощности дуги.

Уравнение Майра через проводимость дуги g [3.1]:

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_D i_D}{P_D} - 1 \right) \quad (3.1)$$

где g – мгновенные значения проводимости дуги, См; t – текущее время разряда, с; τ – тепловая постоянная инерции, с; u_D – мгновенные значения напряжения столба дуги, В; i_D – мгновенные значения силы тока дуги, В; P_D – отводимая от дуги мощность, Вт.

При компьютерном моделировании удобнее применять следующую систему уравнений на основе (3.1):

$$\begin{cases} \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{g u_D^2}{P_D} - 1 \right) \\ i_D = g u_D \end{cases} \quad (3.2)$$

Отводимая от дуги мощность P_D представляется упрощенно с использованием статической вольтамперной характеристики дугового разряда

$u_D = u_K + (ad + \frac{bd}{i_D}) v t$ в виде [85]:

$$P_D = \left[u_K + E_{д.ср} (i_D) l_D \right] i_D = i_D (u_K + ad \cdot v \cdot t) + bd \cdot v \cdot t \quad (3.3)$$

где l_D – длина дугового разряда (межконтактное расстояние), мм; u_K – минимальное значение катодного падения напряжения; для катода, изготовленного из кадмия, $u_K = 8$ В; v – скорость размыкания контактов, мм/с; ad, bd – коэффициенты, характеризующие условия получения характеристик для ограниченных диапазонов начального тока дугового разряда: $ad = 82,81$ В/мм, $bd = 2,42$ В·А/мм при $i_D = 0,024 \dots 0,1$ А и $ad = 43,89$ В/мм, $bd = 5,18$ В·А/мм при $i_D = 0,05 \dots 2$ А; t – время движения контактов, с; $E_{д.ср}$ – усредненное значение напряженности поля в столбе и анодной области дуги.

Постоянная инерции дуги τ зависит от тока разряда и радиуса столба. Если ограничиться температурами, не превышающими 10000 К (слаботочные цепи), можно использовать одночленную степенную аппроксимацию тепловых функций дуги, приведенную в [86] для воздуха при атмосферном давлении. Для расчета τ в модели используется аналитическое выражение:

$$\tau = \frac{r_0^2 \cdot D_b \cdot (2\pi r_0 \sqrt{B_p})^{\frac{2(1-b)}{p+1}}}{i^{\frac{2(1-b)}{p+1}}} \quad (3.4)$$

где r_0 – расчетный радиус столба дуги, см; коэффициенты $B_p=1,76 \cdot 10^{-7}$, $b=0,25$, $D_b=0,18$, $p=3,5$.

Вычисление расчетного радиуса столба дуги в модели осуществляется за счет введенного в него массива данных зависимости $r_0(P_d)$, полученной по разработанному модифицированному методу «источников» [87] и представленной на рисунке 3.1.

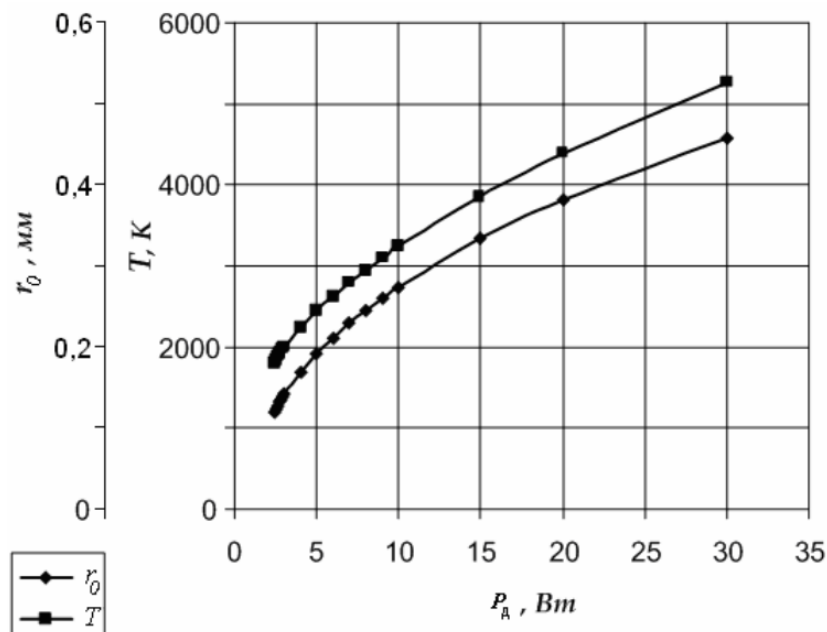
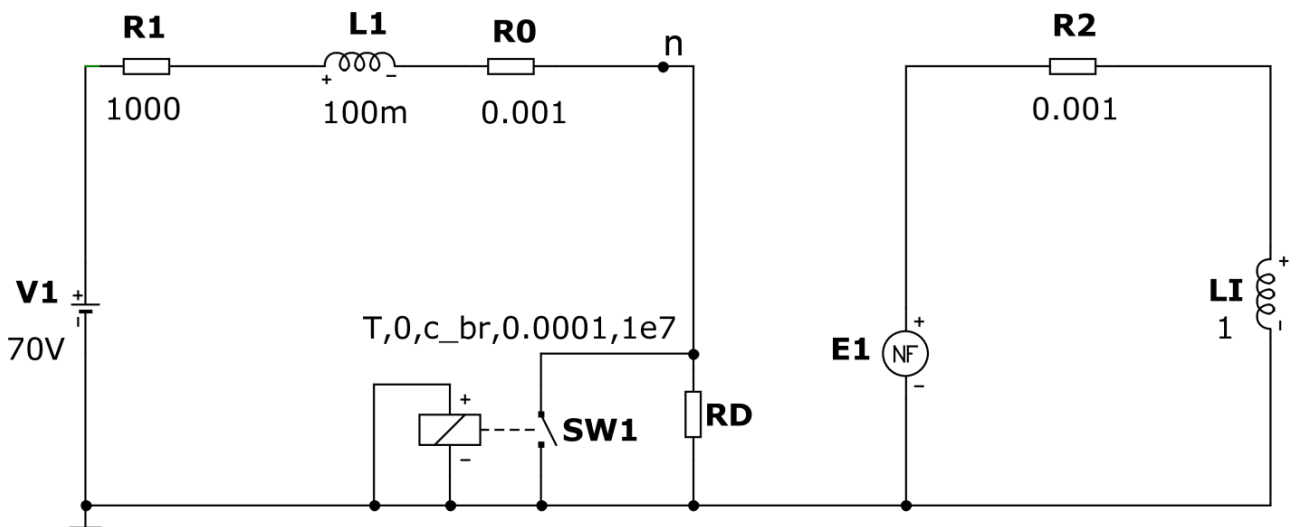


Рисунок 3.1 – Зависимость максимума температуры T и радиуса r_0 цилиндрического столба дуги от мощности дуги P_d при скорости размыкания контактов искробразующего механизма $v=6500$ мм/с

Компьютерная модель метода [42] в пакете MicroCAP-12, представленная на рисунке 3.2, дает возможность получить исходные данные оценки: энергию разряда $W_p(T_p)$, длительность разряда T_p .

```
.DEFINE vs 6500
.DEFINE Bp 1.76E-7
.DEFINE b 0.25
.DEFINE Db 0.18
.DEFINE p 3.5
.DEFINE c_br 2m
.DEFINE VD if(T<c_br,V(n),V(n)-8)
.DEFINE PD if(VD<0,0,I(R0)*VD)
.DEFINE r TABLE(2.01),1.9,0.0104,2.4,0.012,2.5,0.0124,2.6,0.0128,2.7,0.0132,
2.8,0.0135,2.9,0.0139,3,0.0142,4,0.0169,5,0.0191,6,0.0211,7,0.0229,8,0.0243,9,0.026,
10,0.0274,15,0.0334,20,0.0382,30,0.0458,40,0.0519,50,0.0571,60,0.0617,80,0.0695,90,0.0729,100,0.0
761,110,0.08,120,0.0828,130,0.086,140,0.0885,150,0.092,170,0.0985,
200,0.11,250,0.126)
.DEFINE tau ((r^2)*Db*(2*pi*r*sqrt(Bp))^(2*(1-b)/(p+1)))/(I(R0)^(2*(1-b)/(p+1)))
```



RD: if(T<c_br,1e-4,STP(c_br)*1/EXP(I(LI)))

E1 = STP(c_br)*(1/tau)*((EXP(I(LI))*V(RD)^2)/(I(R0)*(8+43.89*vs*(T-c_br))+5.18*vs*(T-c_br))-1)

Рисунок 3.2 – Расчетная схема моделирования процесса дуговой коммутации резистивной и индуктивной цепи по известному методу [42]

1) – максимальное значение усредненной мощности разряда.

Преимущества модели состоят в удобстве обработки результатов расчетов, возможности задания расчётной схемы в виде, близком к принципиальным

схемам цепей электроники и физическому макетированию. Положительным моментом здесь следует считать возможность использования обширной библиотеки компонентов как зарубежных, так и отечественных производителей, а также редактор новых компонентов.

Сопротивление резистора RD моделирует разряд размыкания и задано при помощи математического выражения:

$$RD = \text{if}(T < c_br, 10^{-4}, STP(c_br) \cdot \frac{1}{EXP(I(LI))}) \quad (3.5)$$

где T – текущее модельное время, с; c_br – момент начала коммутации цепи – размыкание ключа $SW1$, с; $STP(c_br)$ – функция единичного скачка, принимающая «1» при условии $T > c_br$ (начало коммутации) и «0» в остальных случаях; if (условие, параметр 1, параметр 2) – функция, принимающая значение параметра 1 при выполнении условия и параметра 2 в противоположном случае.

Ключ $SW1$ управляется по времени, что соответствует изменению сопротивления от 0,0001 Ом при $T < c_br$ (служит для моделирования замкнутых контактов электрической цепи до коммутации) к сопротивлению 10^7 Ом при $T \geq c_br$.

Для формирования проводимости использован источник напряжения $E1$, который задает напряжение $V(E1)$, соответствующее правой части 1-го уравнения системы (3.2):

$$V(E1) = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{STP(c_br) \cdot (1/\tau) \cdot e^{I(LI)} \cdot V(RD)^2}{I(R0) \cdot (8 + ad \cdot vs \cdot (T - c_br)) + bd \cdot vs \cdot (T - c_br)} - 1, \text{ В} \quad (3.6)$$

где ad и bd – коэффициенты вольтамперной характеристики дуги; vs – скорость коммутации; τ – тепловая постоянная инерции дуги; T – текущее модельное время.

Токовая цепь содержит вспомогательный резистор $R0$ сопротивлением 0,001 Ом, на котором фиксируется ток разряда. Ток через дополнительную индуктивность $LI = 1$ Гн определяет интеграл от напряжения источника $V(E1)$, т.е. $I(LI) = \ln(g)$.

Соответственно, проводимость дуги $\exp(I(LI)) = g$ и сопротивление $RD = 1/e^{(LI)}$. $V1, R1, L1$ —элементы оцениваемой цепи.

Осциллограммы тока, напряжения, энергии и осредненной мощности разряда, полученные при моделировании, приведены на рисунке 3.3. Они показывают физическую картину развития дугового разряда с учетом ступенчатого выброса тока в начальной стадии.

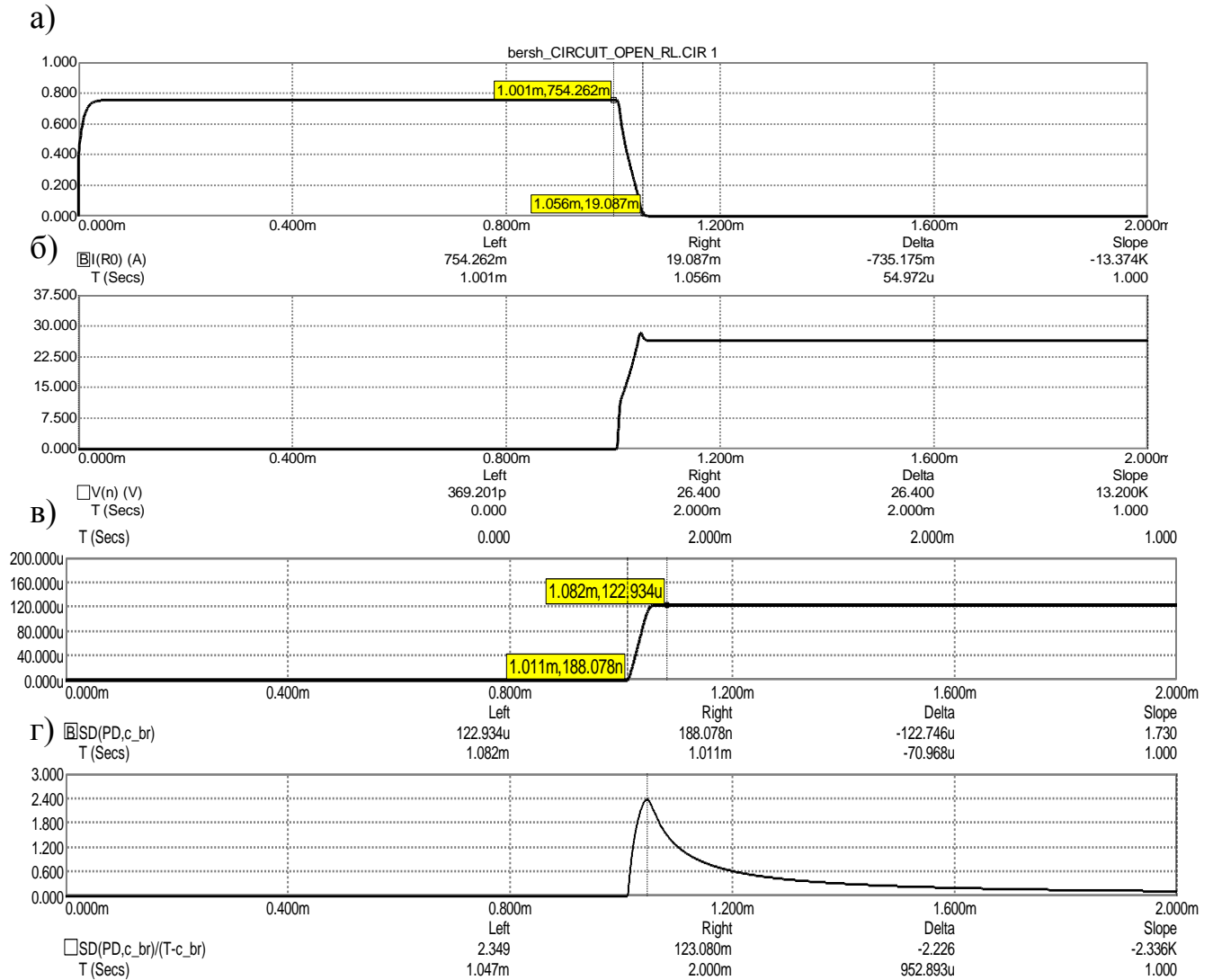


Рисунок 3.3 – Осциллограммы разряда размыкания активно-индуктивной цепи: а) сила тока $I(R0)$; б) напряжение на выходе цепи $V(n)$; в) энергия разряда SD ; г) осредненная мощность разряда $SD/(T-c_br)$

В представленной модели (рисунок 3.2) определяется тепловая постоянная инерции дугового разряда τ по максимальному значению усредненной

мощности разряда (рисунок 3.3г)) и не учитывает ее динамику. Это приводит к неоптимальной сходимости результатов моделирования.

Экспериментально подтверждено, что величина τ на протяжении дугового разряда в слаботочной цепи меняет свое значение в зависимости от мощности, поступающей в разряд при соблюдении баланса отводимой и поступающей мощности дуги. Это подчеркивает целесообразность определения величины τ не по максимальному значению средней мощности разряда, а с учетом мгновенных значений средней мощности разряда.

Также стоит отметить, что в модели (рисунок 3.2) расчет мощности разряда PD производится с учетом потерь на катоде u_k , что справедливо для расчета энергии дугового разряда [88, 89], но не для определения максимального значения средней мощности разряда $SD/(T-c_{br})$ как эквивалент отводимой от дуги мощности P_d .

Таким образом, с целью устранения вышеизложенных недостатков известного расчетного метода оценки искробезопасности разработана уточненная компьютерная модель (рисунок 3.4), которая включает в себя следующие изменения:

- расчет мощности разряда PD производится без учета u_k и применяется только для подсчета энергии дугового разряда с помощью выражения $SD(PD, c_{br})$;

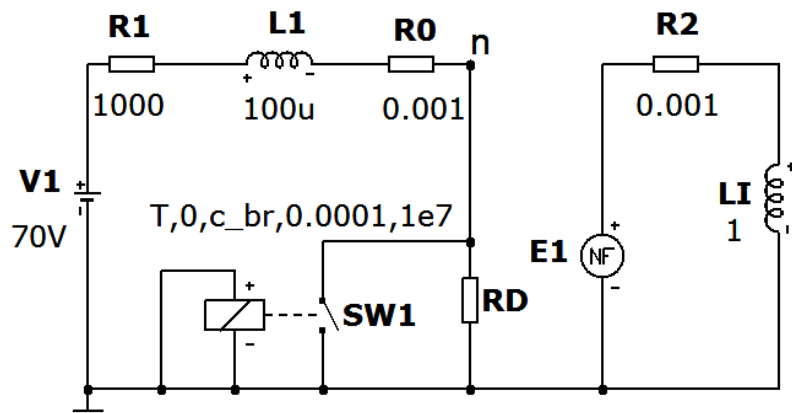
- определение отводимой от дуги мощности $PD1$ производится с учетом u_k по формуле (3.3) и используется для вычисления мгновенных значений средней мощности разряда D с помощью выражения $SDT(PD1)/(T-c_{br})$;

- расчет тепловой постоянной инерции дугового разряда τ производится с учетом динамики мгновенных значений средней мощности разряда D .

```

.DEFINE vs 6500
.DEFINE Bp 1.76E-7
.DEFINE b 0.25
.DEFINE Db 0.18
.DEFINE p 3.5
.DEFINE c_br 2m
.DEFINE VD if(T<c_br,V(n),V(n)-8)
.DEFINE PD if(VD<0,0,I(R0)*VD)
.DEFINE PD1 (I(R0)*(8+43.89*vs*(T-c_br))+5.18*vs*(T-c_br))
.DEFINE D if(T<c_br,0,SDT(PD1)/(T-c_br))
.DEFINE r TABLE (D,1.9,0.0104,2.4,0.012,2.5,0.0124,2.6,0.0128,2.7,0.0132,2.8,0.0135,
2.9,0.0139,3,0.0142,4,0.0169,5,0.0191,6,0.0211,7,0.0229,8,0.0243,9,0.026,10,0.0274,15,0.0334,20,0.0
382,30,0.0458,40,0.0519,50,0.0571,60,0.0617,80,0.0695,90,0.0729,100,0.0761,110,0.08,120,0.0828,1
30,0.086,140,0.0885,150,0.092,170,0.0985,200,0.11,250,0.126)
.DEFINE tau ((r^2)*Db*(2*pi*r*sqrt(Bp))^(2*(1-b)/(p+1)))/(I(R0)^(2*(1-b)/(p+1)))

```



RD: if((v(n)<8)AND(T>c_br+1u),1e2,STP(c_br)*1/EXP(I(LI)))

E1= STP(c_br)*(1/tau)*((EXP(I(LI))*V(RD)^2)/(I(R0)*(8+43.89*vs*(T-c_br))+5.18*vs*(T-c_br))-1)

Рисунок 3.4 – Уточненная модель дуговой коммутации резистивной и индуктивной цепи

Процесс моделирования разряда размыкания выражен через сопротивление резистора RD и включает в себя условие прекращения дуги:

$$RD = \text{if}((v(n) < 8) \text{AND} (T > c_br + 1\mu), 10^2, \text{STP}(c_br) \cdot \frac{1}{\text{EXP}(I(LI))}) \quad (3.7)$$

При достижении условия прекращения дугового процесса: $v(n) < 8$ (напряжение на разряде менее 8 В) и $T \geq c_br + 1\mu$ (после начала коммутации с учетом времени переходных процессов 1 мкс), сопротивление дуги становится не менее 100 Ом.

3.2. Экспериментальное определение динамики тепловой постоянной инерции на протяжении всего дугового разряда

Важным теплофизическим параметром, который используется в моделях расчетной оценки искробезопасности электрических цепей является тепловая постоянная инерции электрической дуги (τ). Она характеризует тепловую инерционность при изменении электрических свойств дуги в нестационарных режимах, которая определяется теплофизическими характеристиками дугового канала [90]. На сегодняшний день отсутствуют достоверные экспериментальные сведения о динамике изменения ее значений на протяжении дугового разряда в слаботочной цепи. Учет экспериментальной динамики τ в моделях обеспечит повышение достоверности расчетной оценки искробезопасности электрических цепей.

Единого аналитического выражения для постоянной времени дуги пока не существует, так как нет универсальной формулы, которая выражала бы вольтамперную динамическую характеристику дуги, из которой получалось бы выражение для постоянной времени. Но обычно постоянная времени представляет отношение, в числитель которого входят величины, характеризующие теплоемкость дугового канала, а в знаменатель - параметры, которые определяют ее теплоотводящие свойства. Из выражения динамической вольтамперной характеристики дуги (3.8):

$$\frac{d}{dt} \ln \frac{i_{\text{д}}}{E} = \frac{Ei_{\text{д}}}{Q_0} \quad (3.8)$$

вытекает формулировка постоянной времени τ :

$$\tau = \frac{Q_0}{P_0} \quad (3.9)$$

где P_0 – мощность, отводимая от единицы длины дуги; Q_0 – количество тепла, при внесении которого в столб (или удалении которого из столба) сопротивление последнего изменяется в $e=2,7$ раз, Q_0 - прямо пропорционально

площади поперечного сечения столба дуги; E и i_d - градиент напряжения и ток дуги.

На сегодняшний день известны три исследовательских метода определения тепловой постоянной времени дуги [91].

Для исследования динамики изменения значений постоянной времени дуги разработан и изготовлен стенд для исследования разрядов размыкания в искробезопасной цепи с регулированием скорости размыкания (рисунок 3.5).

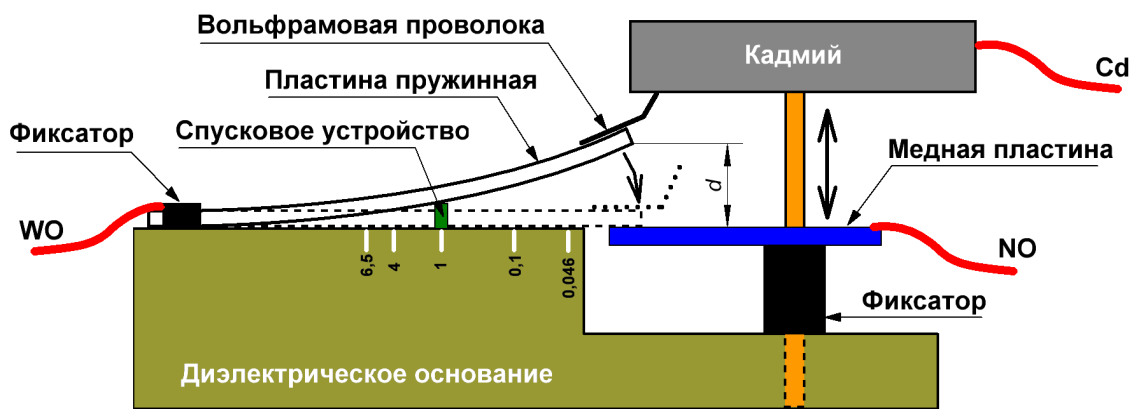


Рисунок 3.5 – Стенд для исследования разрядов размыкания в искробезопасной цепи

Отклонение пластины d прямо пропорционально скорости размыкания проволоки с диском за счет увеличения силы противодействия в пластине при большем отклонении.

Для определения тепловой постоянной времени дуги применен, с точки зрения оптимальности обработки экспериментальных данных (переходных процессов дуги) метод, заключающийся в следующем.

Уравнение (3.8) можно записать:

$$R_d \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_d} \right) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_d i_d}{P_0 l_d} - 1 \right) \quad (3.10)$$

По снятым осциллограммам тока и напряжения дуги в динамическом режиме строится зависимость (рисунок 3.6, а):

$$-R_{\text{д}} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_{\text{д}}} \right) = f(u_{\text{д}} i_{\text{д}}) \quad (3.11)$$

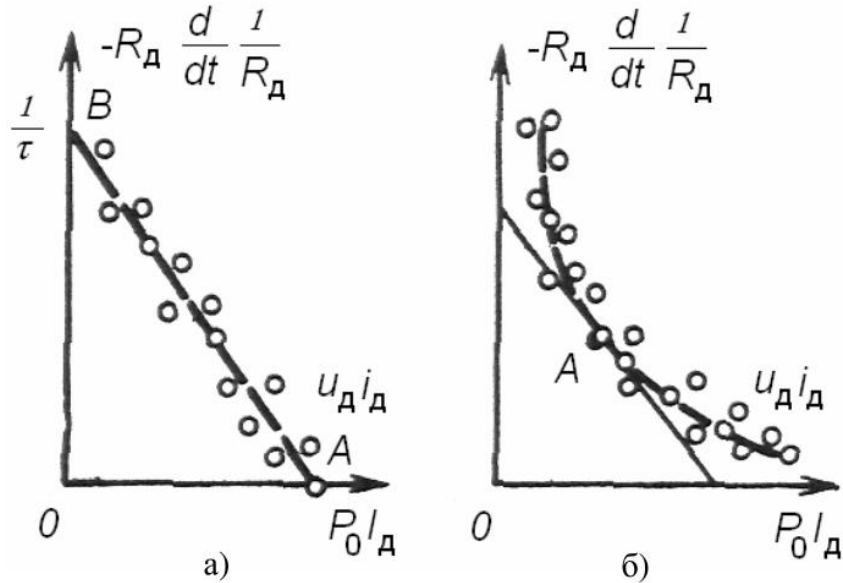


Рисунок 3.6 – К определению тепловых параметров дуги

Линия, проведенная по опытным точкам на графике, отсечет на оси $u_{\text{д}} \cdot i_{\text{д}}$ отрезок OA , равный $P_0 \cdot l_{\text{д}}$, а на оси ординат - отрезок OB , который определит величину постоянной времени:

$$\tau = \frac{1}{\left[R_{\text{д}} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_{\text{д}}} \right) \right]_{OB}} \quad (3.12)$$

Метод применим для определения τ и $P_0 \cdot l_{\text{д}}$, если они остаются неизменными во времени, и эта зависимость изображается в виде прямой линии. В условиях дуговых разрядов низкого напряжения эта зависимость обычно не бывает прямолинейной, что свидетельствует об изменчивости во времени величин τ и $P_0 \cdot l_{\text{д}}$. Ее характерный вид приведен на рисунок 3.6, б.

Проведем дальнейшую разработку этого метода для случая, когда тепловые параметры дуги изменяются во времени.

Обозначим

$$y = \frac{1}{R_{\text{д}}} \frac{dR_{\text{д}}}{dt}; \quad x = u_{\text{д}} i_{\text{д}} \quad (3.13)$$

Тогда:

$$y = \frac{1}{\tau} \left(1 - \frac{x}{P_0 l_{\text{д}}}\right) \quad \text{и} \quad \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{\tau P_0 l_{\text{д}}} \quad (3.14)$$

Если по осциллограммам тока и напряжения дуги или сопротивления дуги построить зависимость $y=f(x)$, то по ней можно найти и производную dy/dx . Таким образом, произведение параметров $P_0 \cdot l_{\text{д}}$ может быть найдено из выражения:

$$y = \frac{1}{\tau P_0 l_{\text{д}}} (P_0 l_{\text{д}} - x) \quad (3.15)$$

С учетом (3.14) имеем:

$$y = \frac{dy}{dx} (P_0 l_{\text{д}} - x) \quad (3.16)$$

Откуда:

$$(P_0 l_{\text{д}})_A = (u_{\text{д}} i_{\text{д}})_A - \frac{\left[\frac{1}{R_{\text{д}}} \frac{dR_{\text{д}}}{dt} \right]_A}{(dy/dx)_A} \quad (3.17)$$

Имея соответствующие данные по $u_{\text{д}}$, $l_{\text{д}}$ и $R_{\text{д}}$, из осциллограмм по этой формуле можно определить величину $P_0 \cdot l_{\text{д}}$ для соответствующей точки. Для той же точки можно по (3.14) найти:

$$\tau = \frac{1}{(P_0 l_{\text{д}})_A (dy/dx)_A} \quad (3.18)$$

Проведем экспериментальные исследования динамики изменения значений постоянной времени τ на всем протяжении дугового разряда в резистивной цепи напряжением 24 В, током 1,2 А и скоростью размыкания 1 м/с по вышеизложенной методике. С помощью стенда для исследования разрядов размыкания в искробезопасной цепи (рисунок 3.5) путем осциллографирования получены и приведены на рисунке 3.7 переходные процессы напряжения и тока дуги.

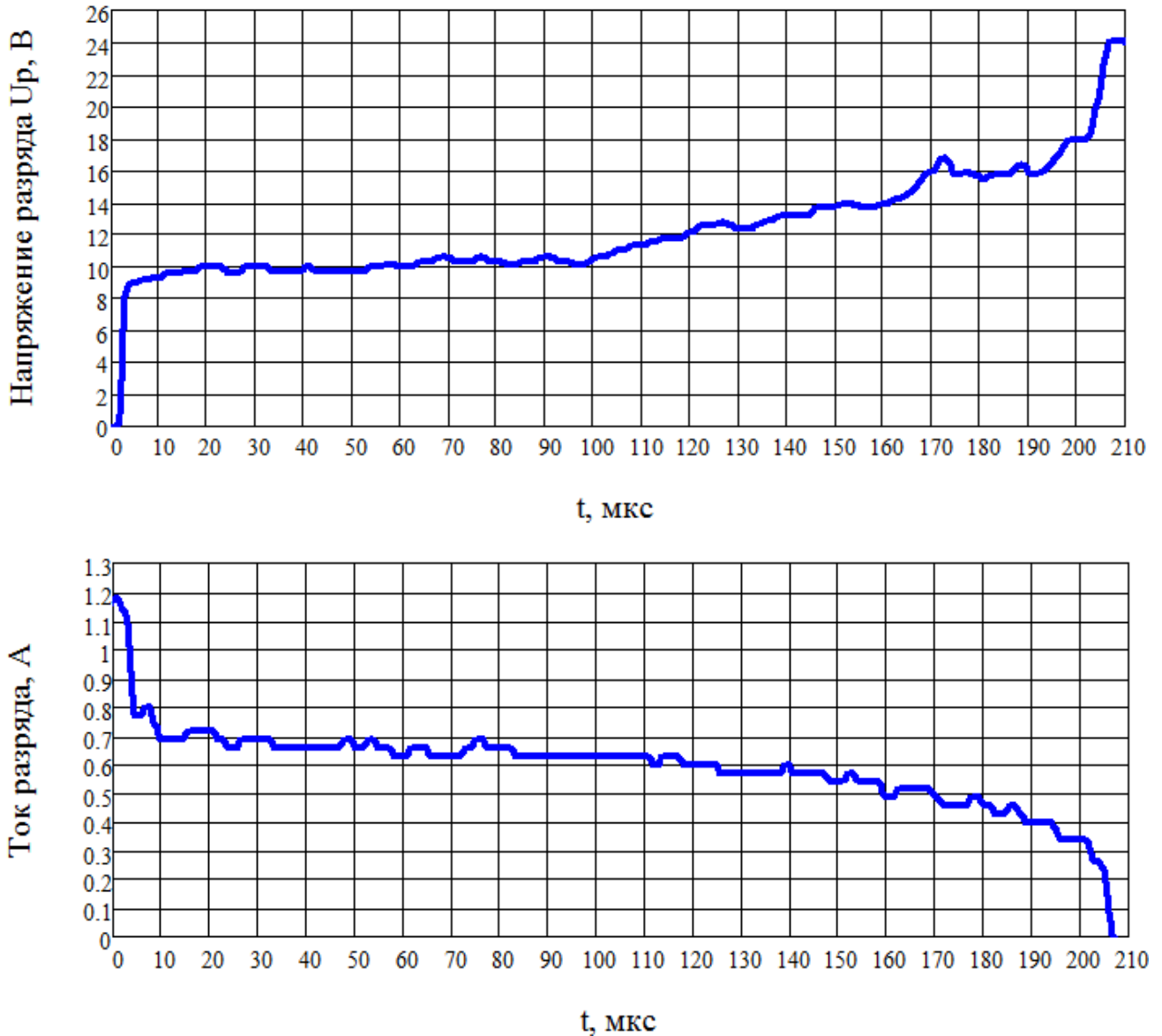
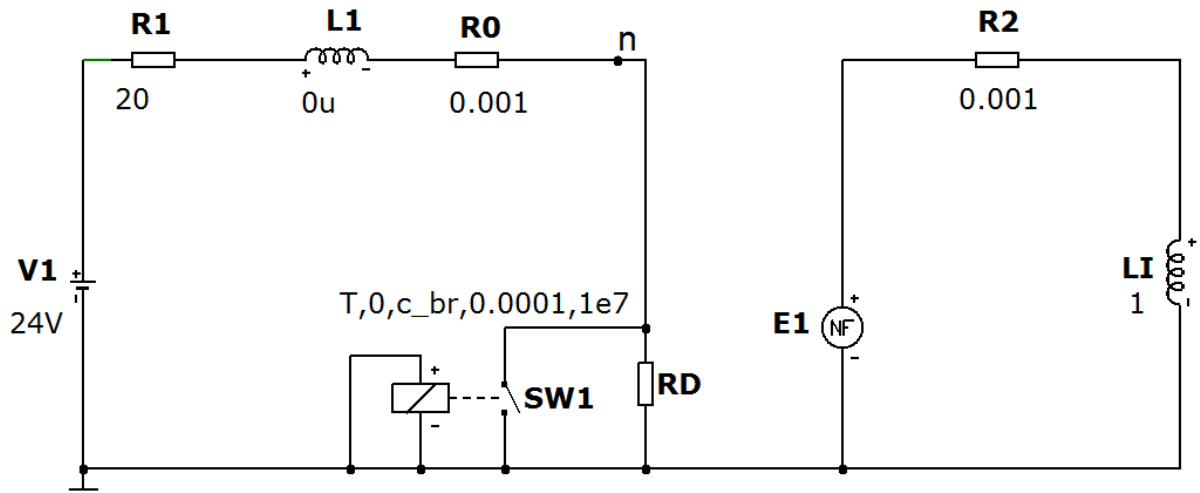


Рисунок 3.7 – Осциллограммы переходных процессов напряжения и тока дуги от времени

По экспериментальным данным (рисунок 3.7), с помощью вышеизложенной методики (уравнения (3.13)...(3.18)) получена зависимость тепловой постоянной инерции дуги от времени. Путем моделирования аналогичной резистивной цепи (рисунок 3.8) также получены зависимости тепловой постоянной времени дуги от времени с помощью различных моделей разряда (рисунок 3.9):

- на уточненной модели (с учетом настроек рисунок 3.4);
- на модели метода [42];
- на модели метода [38].



RD: if($T < c_br$, $1e-4$, $STP(c_br) * 1 / EXP(I(LI))$)

E1 = $STP(c_br) * (1/\tau) * ((EXP(I(LI)) * V(RD)^2) / (I(R0) * (8 + 43.89 * v_s * (T - c_br)) + 5.18 * v_s * (T - c_br)) - 1)$

Рисунок 3.8 – Расчетная схема моделирования процесса дуговой коммутации резистивной цепи

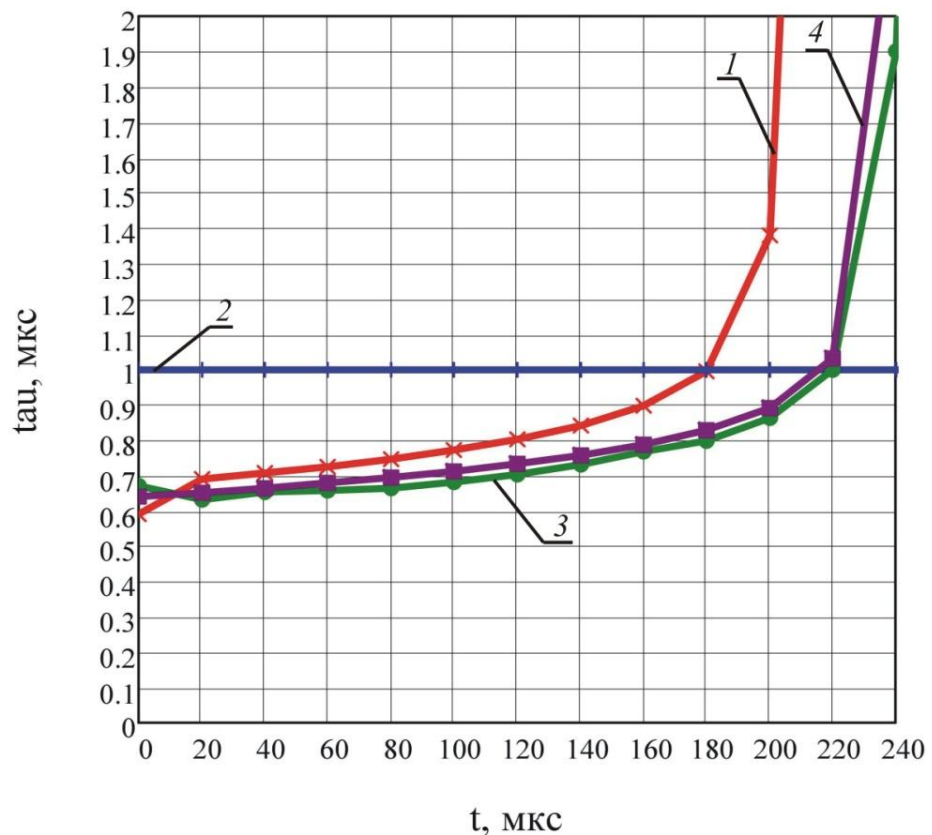


Рисунок 3.9 – Зависимости тепловой постоянной времени от времени разряда
 где 1 – модель метода [42]; 2 – модель метода [38]; 3 – эксперимент; 4 – уточненная модель метода [42]

В результате расчетов установлено и экспериментально подтверждено, что за период коммутации (208 мкс) тепловая постоянная инерции электрической дуги τ изменяется в 1,4 раза и имеет экспоненциально возрастающий характер. При этом динамика роста и порядок величин τ уточненной модели (кривая 4 рисунок 3.9) приближены к экспериментальным данным (кривая 3 рисунок 3.9).

3.3. Тестирование компьютерной модели для оценки искробезопасности индуктивно-резистивных цепей.

Энергия разряда $W_p(T_p)$ и его продолжительность T_p при размыкании контактов с различными скоростями ($v = 0,046$ м/с - 6,5 м/с) просчитывалась при достижении тока обрыва $i_0 = 20$ мА согласно ГОСТ Р 51330.10 на компьютерных моделях (рисунки 3.2, 3.4) и по экспериментальным данным (осциллограммам тока и напряжения разряда) при граничных условиях $W_p(T_p)/W_b(v, T_p) = 1$.

Граничные условия достигались путем:

- изменения тока в цепи при неизменном напряжении (для резистивных цепей);
- изменения тока в цепи при неизменном напряжении и индуктивности (для индуктивных цепей);
- изменения значения внешней индуктивности при неизменном напряжении и токе в цепи (для источников питания).

Полученные граничные параметры цепи (ток, внешняя индуктивность) сравнивались с аналогичными данными ($I_{гр}$, $L_{гр}$), приведенными в ГОСТ Р 51330.10 или данными, полученными в результате испытаний на искрообразующем механизме.

Предварительно было установлено, что наиболее опасными для резистивных цепей являются низкие скорости коммутации ($v_s = 0,046$ м/с), а для индуктивных цепей и источников питания, отключаемых при коммутации - высокие скорости размыкания ($v_s = 6,5$ м/с).

Результаты моделирования и эксперимента при граничных условиях резистивных цепей при $v_s = 0,046$ м/с (таблица 3.1), индуктивных цепей при $v_s = 6,5$ м/с (таблица 3.2), источников питания, отключаемых при коммутации при $v_s = 6,5$ м/с (таблица 3.3).

Таблица 3.1- Граничные токи и параметры разряда, полученные путем расчета и эксперимента в простых резистивных цепях

$U, В$	$I, А$	$I_{гр}, А$ [26]	$\delta = \frac{ I - I_{гр} }{I_{гр}} \cdot 100, \%$	Модель			Эксперимент	
				$W_p,$ мДж	$T_p,$ мс	Тип	$W_p,$ мДж	$T_p,$ мс
24	1,176	1,057	11,6	8,335	3,812	[42]	8,31	3,79
24	1,159		9,6	8,14	3,773	[42] ¹⁾	8,2	3,76
24	1,11		5	7,215	2,964	[38]	7,66	3,72
30	0,715	0,71	0,7	8,4	4,447	[42]	8,7	4,44
30	0,69		2,8	8,235	4,37	[42] ¹⁾	8,25	4,38
30	0,64		9,8	7,189	3,385	[38]	7,354	4,23
50	0,3	0,26	15,3	9,78	5,85	[42]	9,78	5,84
50	0,297		14,2	9,76	5,844	[42] ¹⁾	9,77	5,83
50	0,25		3,8	7,172	4,112	[38]	7,3	5,3

[42]¹⁾ – уточненная модель (рисунок 3.4).

Таблица 3.2- Граничные токи и параметры разряда, полученные путем расчета и эксперимента в простых индуктивных цепях

$U, В$	$I, А$	$L,$ мГн	$I_{гр}, А$ [26]	$\delta = \frac{ I - I_{гр} }{I_{гр}} \cdot 100,$ %	Модель			Эксперимент	
					$W_p,$ мкДж	$T_p,$ мкс	Тип	$W_p,$ мкДж	$T_p,$ мкс
24	0,11	100	0,1	10	500	124	[42]	565	138
24	0,102			2	478	125	[42] ¹⁾	480	126
24	0,075			25	375,6	89,2	[38]	252	109
24	0,08	200	0,07	14,2	552	154	[42]	563	142
24	0,075			7,1	504	135	[42] ¹⁾	508	136
24	0,053			24,2	375	88,9	[38]	250	90

Окончание таблицы 3.2- Граничные токи и параметры разряда, полученные путем расчета и эксперимента в простых индуктивных цепях

U, В	I, А	L, мГн	I _{гр} , А [26]	$\delta = \frac{ I - I_{гр} }{I_{гр}} \cdot 100, \%$	Модель			Эксперимент	
					W _p , мкДж	T _p , мкс	Тип	W _p , мкДж	T _p , мкс
24	0,34	10	0,33	3	533	147	[42]	527	108
24	0,32			3	450	113	[42] ¹⁾	451	114
24	0,266			19	365	84,7	[38]	320	100
70	0,095	100	0,11	13,6	517	140	[42]	478	145
70	0,1			9	511	138	[42] ¹⁾	515	140
70	0,07			40	379	90,7	[38]	263	114

Таблица 3.3- Граничные индуктивности и параметры разряда, полученные путем расчета и эксперимента цепей источников питания, отключаемых при коммутации

U, В	I, А	L, мкГн	L _{гр} , мкГн	$\delta = \frac{ L - L_{гр} }{L_{гр}} \cdot 100, \%$	Модель			Эксперимент	
					W _p , мкДж	T _p , мкс	Тип	W _p , мкДж	T _p , мкс
ИПИ24-3									
26,4	4,95	55	50	10	646	17,3	[42]	565	29
26,4	4,95	52		4	595	22,8	[42] ¹⁾	531	27
26,4	4,95	305		510	330	33,9	[42]	3700	51
АГАТ ВН-24-30									
26,4	4,5	58	52	11,5	576	18	[42]	565	29
26,4	4,5	54		3,8	529	27	[42] ¹⁾	531	27
26,4	4,5	315		517	331	34	[38]	3130	49

Таким образом, тепловую постоянную инерции *tau* можно определять по усредненным значениям мощности разряда, а лучше – по мгновенным значениям мощности разряда (рисунок 3.4). В этом случае получим лучшую сходимость результатов моделирования.

3.4. Обоснование методики бескамерной оценки искробезопасности сложных индуктивно-резистивных цепей

Основой предложенной методики бескамерной оценки искробезопасности сложных индуктивно-резистивных цепей служат результаты, полученные в пп. 3.1, 3.3. Методика заключается в следующем:

1. В среде программирования Micro-Cap-12 собрать исследуемую электрическую цепь, присоединить в разрыв испытуемой электрической цепи блок дугового размыкания согласно рисунку 3.10.

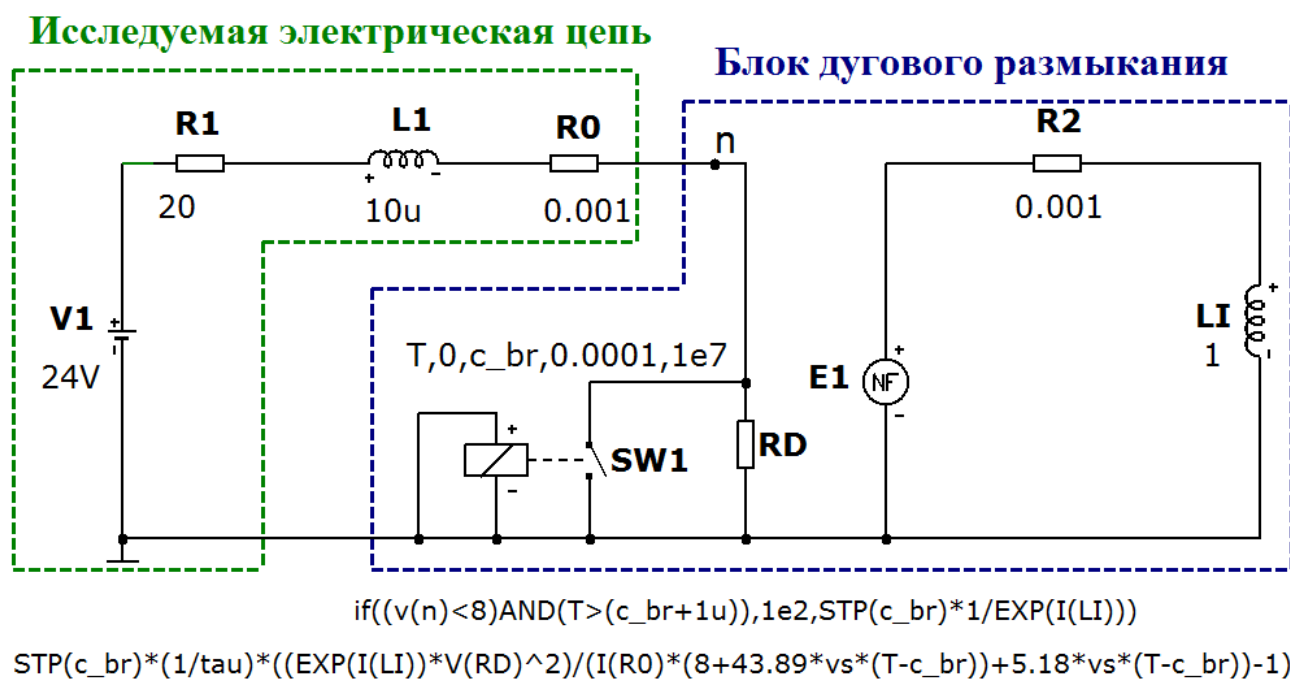
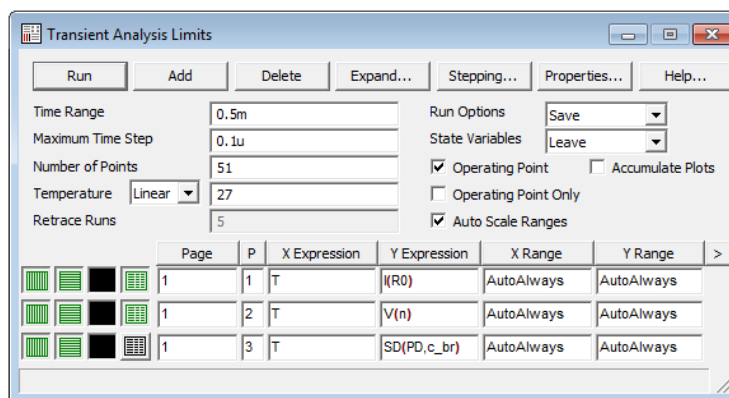


Рисунок 3.10 – Моделирование разряда размыкания в среде программирования

Micro-Cap - 12

2. На вкладке *Text* проверить, а, в случае его отсутствия, поместить описание согласно рисунку 3.4.

3. Вывести переходные процессы тока разряда $I(R0)$, напряжения разряда $v(n)$ и энергии разряда $SD(PD, c_{br})$ от времени T :



4. Для различных скоростей коммутации $v_i = 6,5; 4; 1,8; 0,9; 0,3; 0,11; 0,046$ м/с определить энергию разряда за вычетом катодных потерь W_{pi} (уже учтено в модели) и его длительность T_{pi} (при токе обрыва $I_0 = I(R_0) = 20$ мА). В большинстве практически встречающихся случаев достаточно проверить две предельные скорости $v_{max} = 6,5$ м/с; $v_{min} = 0,046$ м/с.

5. Для выбранных по п.4 значений v_i и T_i , пользуясь зависимостями приложения Г, полученными в результате математического моделирования, определить минимальную воспламеняющую энергию W_g . Расчетная форма (приложение Г) зависит от диапазона, в который входит полученное T_{pi} .

6. Цепь считается искробезопасной (с учетом коэффициента запаса по току), если для всех учитываемых скоростей коммутации $\frac{W_g}{W_p} > 1$.

Данная методика допускает определение значений W_p и T_p экспериментальным путем (с помощью макета или образца) – по переходным процессам напряжения разряда и тока разряда, снятым по схеме (рисунок 2.2) посредством запоминающего осциллографа. При этом расчет W_p рекомендуется выполнять по формуле 6 при условии $I_p \geq I_0$. После чего выполнить пп.5-6 данной методики.

Цепь считается искробезопасной (с учетом коэффициента запаса по току), если для всех учитываемых скоростей коммутации $\frac{W_g}{W_p} > 1$.

3.5 Выводы

1. Разработана и обоснована усовершенствованная математическая модель разряда в индуктивно-резистивных электрических цепей, позволяющая уточнить известный расчетный метод оценки их искробезопасности. Во всех диапазонах скоростей энергетические показатели, полученные при моделировании приближены к экспериментальным данным с точностью не более 2 %.

1. Установлено и экспериментально подтверждено, что за период коммутации тепловая постоянная инерции электрической дуги τ_{th} изменяется в 1,4 раза. В случае неучета этого явления, вносятся существенные погрешности (до 510%) в определение минимальных воспламеняющих токов. Погрешности возрастают с увеличением напряжения в индуктивных цепях и сокращением времени разряда, оказывая существенное влияние на оценку источников питания с динамической защитой.

2. Выполнена сравнительная оценка минимальных воспламеняющих токов омических и индуктивных цепей с экспериментальными данными ИЕС 60079-11. В диапазоне напряжений 24÷70 В погрешность не превосходит 14% для омических цепей и 9 % для индуктивных цепей.

3. Предложен усовершенствованный метод бескамерной оценки искробезопасности сложных индуктивно-резистивных цепей, позволяющий производить оценку источников питания с нелинейной вольтамперной характеристикой, включая источники с динамической защитой, с погрешностью не более 4 % от оценок, полученных с помощью испытательных камер.

ГЛАВА 4

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ
ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ

4.1. Оптимизация технических характеристик шахтного освещения с учетом предельных параметров искробезопасности

Анализ направлений в обеспечении безопасности применения электрической энергии в шахтах показал, что перспективным, на сегодняшний день, является внедрение в электрических устройствах освещения вида взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь «i»». Поскольку им полностью устраняются условия воспламенения окружающей среды, поражения людей электрическим током, а также недостатки альтернативных способов обеспечения взрывобезопасности, рассмотренных в п.1.1.

На практике, при внедрении искробезопасных систем освещения, возникают определенные трудности в выборе сечения и длины контрольного кабеля, исходя из достаточного количества светильников, обеспечивающих нормируемый уровень освещенности рабочего пространства (табл. 1.1). Связано это с тем, что не все системы освещения комплектуются соединительными кабелями, существенно отличаются для разных шахт длины освещаемых выработок (рабочего пространства) и соответственно количество необходимых светильников. И при этом следует учитывать предельные (максимальные) параметры источников питания (I_0 , U_0), внутренние параметры нагрузки (C_i , L_i), а также распределенные параметры кабельной линии (C_c , L_c) электрической системы [92].

Расчет сечения от длины кабеля, количества светильников приведен в работе [94], но он не учитывает проверку соблюдения параметров искробезопасности.

Обоснование технических характеристик шахтного освещения для очистных выработок на базе светильников КУОШ.100 (ЧАО «НПП МЗША», г.

Макеевка, Донецкой обл.) с учетом предельных параметров искробезопасности [95] заключается в следующем.

Светильник КУОШ.100 (рисунок 4.1) включает в себя сверхмощный светодиод, с потребляемой мощностью $P_{led} = 6$ Вт, углом рассеивания 120° и диапазоном рабочего напряжения от 27 до 40 В постоянного тока ($34 \text{ В} \pm 20\%$).

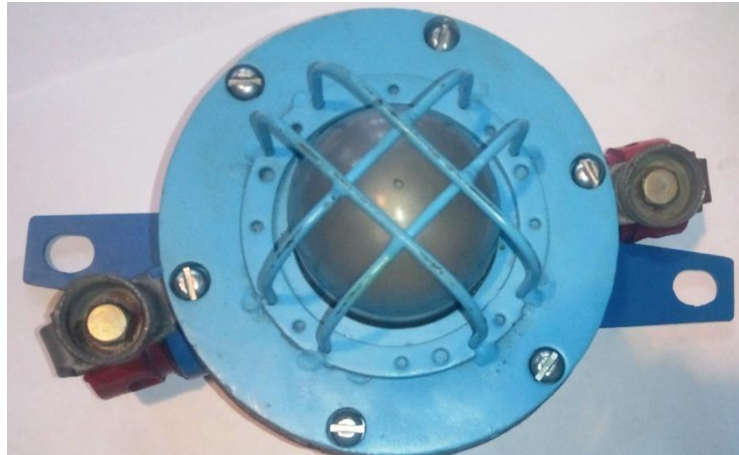


Рисунок 4.1 – Внешний вид светильника КУОШ.100

При исследованиях приняты следующие допущения:

- протяженность очистной выработки DL с мощностью вынимаемого пласта $L=1,5$ м составляет 300м;
- выработка оснащена крепью механизированной типа ДМ с шагом установки секций 1,5 м;
- нормируемый уровень освещенности рабочего пространства в соответствии с таблицей 1.1 не ниже $E_{норм}=5$ лк.

Исходными данными для определения достаточного количества светильников N (шт) системы освещения является протяженность выработки D (м) и расстояние между светильниками D_{led} (м), обеспечивающие нормируемый уровень освещенности рабочего пространства:

$$N = \frac{D}{D_{led}} \quad (4.1)$$

Расстояние между светильниками D_{led} определяется графически по диаграмме освещенности $E(L, h)$ и принимает значение удвоенного отклонения

от оси свечения h при требуемом уровне освещенности $E_{\text{норм}}$ на заданной высоте подвеса светильника $L=1,5\text{ м}$.

Диаграмма освещенности светильника КУОШ.100 (рисунок 4.2), полученная в результате лабораторных измерений, показывает, что на высоте подвеса 1,5 м нормируемый уровень освещенности 5 лк обеспечивается при отклонении от оси свечения $h=2,6\text{ м}$ (пунктирная линия, рисунок 4.2).

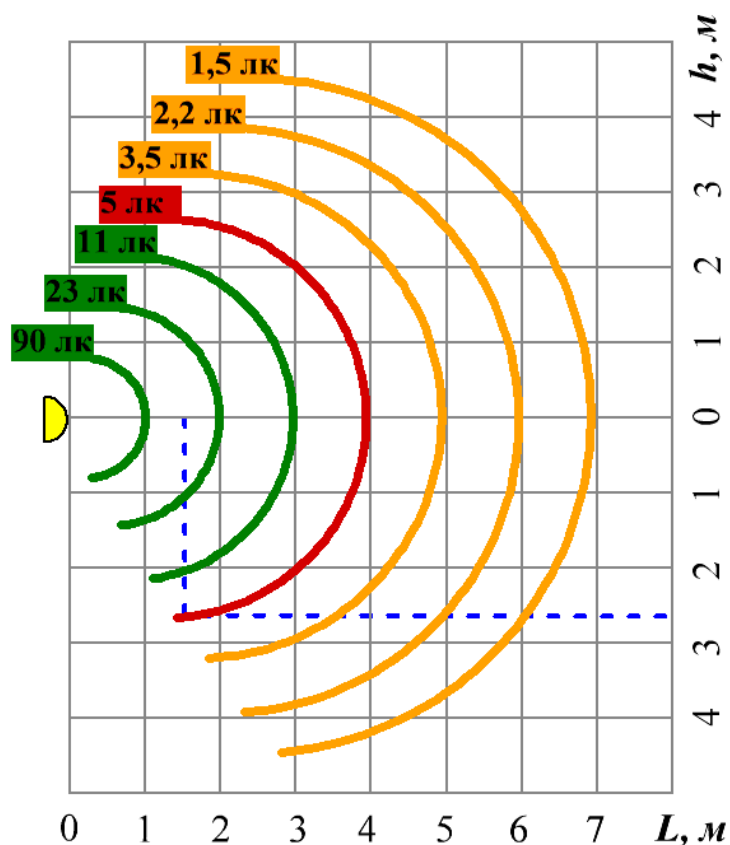


Рисунок 4.2 – Уровень освещенности, создаваемый светильниками КУОШ.100 в зависимости от расстояния L до светильника и отклонения от оси свечения h

Следовательно, при установке светильников на каждую третью секцию крепи на расстоянии $D_{\text{led}}=4,5\text{ м}$ в очистной выработке, мощностью вынимаемого пласта 1,5 м будет обеспечен нормируемый уровень освещенности рабочего пространства не ниже 5 лк (рисунок 4.3).

На рисунке 4.3 а) видно, что «темные зоны» отсутствуют, уровень освещенности соответствует установленным требованиям ($E_{\text{норм}}$). Чаше монтировать светильники нерационально с экономической точки зрения.

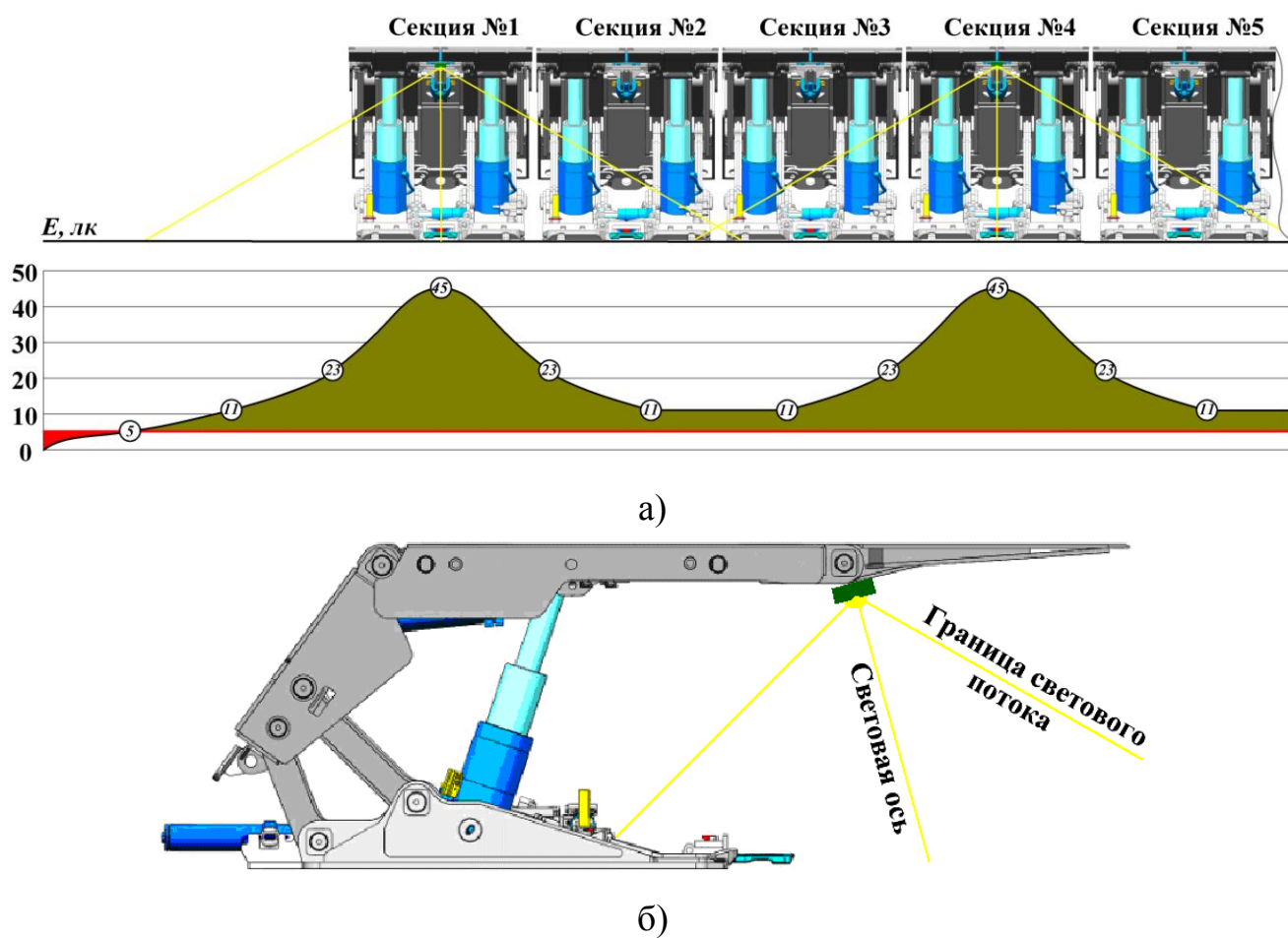


Рисунок 4.3 – Уровень освещенности на почве в местах прохода при установке светильников КУОШ.100 секции крепи типа ДМ: а – уровень освещенности E на почве вдоль световой оси; б – расположение светильника на механизированной крепи.

Таким образом, с учетом (4.1), для освещения очистного забоя, протяженностью $D=300$ м, состоящего из 200 секций и расстоянием между светильниками $D_{led}=4,5$ м (установка на каждую 3-ую секцию) необходимо 68 светильников типа КУОШ.100 (с учетом дополнительного светильника в конце лавы для устранения «темной зоны» на сопряжении со штреком).

Полезная мощность системы освещения $P_{сум}$ должна составлять не менее $P_{сум} = P_{led} \cdot N = 6 \cdot 68 = 408$ Вт. Основным фактором, оказывающим влияние на соотношение распределения данной полезной мощности между каналами источника питания, является значение допустимой искробезопасной мощности

(P_0) с учетом распределенных параметров кабельной линии. Для определения P_0 воспользуемся упрощенным способом оценки искробезопасности, который сводится к сравнению величин энергии разряда W_p и минимально-допустимой энергии воспламенения $W_{\text{доп}}$ в зависимости от длительности разряда T_p .

Величина энергии в разряде для простой индуктивной цепи с учетом допущения о линейном характере убывания тока может быть определена по уравнению В.С. Кравченко [96]:

$$W_p = (I - I_1) \cdot (U + 2I_1 R) \cdot T_p / 6 + L \cdot (I^2 - I_1^2) / 2 \quad (4.2)$$

где W_p – энергия разряда, Дж; I – ток в цепи перед размыканием, А; I_1 – ток обрыва дуги, А; U – напряжение источника питания, В; R , Ом и L , Гн – параметры электрической цепи.

Ток обрыва дуги I_1 – неизвестен. Он зависит от материала контактов и параметров разрядной цепи. В некоторых случаях ток обрыва может быть определен при анализе переходного процесса в размыкаемой цепи. В ГОСТ Р 51330.10-99 указано, что, если фактическое значение тока обрыва неизвестно, то используется значение минимального тока дугового разряда, определяющее физическую возможность существования разряда. В этом случае оценка искробезопасности цепи становится несколько более жесткой.

В то же время согласно (4.2) энергия разряда максимальна при выполнении условия:

$$\frac{\partial W_p}{\partial I_1} = 0 \quad (4.3)$$

Необходимо выяснить, насколько это значение энергии отличается от того, которое принято по току I_1 , рекомендуемого согласно ГОСТ Р 51330.10-99, а также от полученного Абраменко И.Г. Для этого задаются параметры электрической цепи (таблица 4.1) и строится зависимость $W_p(I_1)$ с учетом трех значений тока I_1 (I_{11m} , I_{12m} , I_{13m}), обеспечивающих максимум энергии W_p (W_{11m} , W_{12m} , W_{13m}) – рисунок 4.4. Выражение для тока I_{11m} получено согласно работе [97],

I_{12m} – по формуле (4.4) с учетом (4.3), I_{13m} – в соответствии с предположением ГОСТ Р 51330.10-99.

$$I_1 = \frac{1}{2} \cdot T_p \frac{2RI - U}{3L + 2RT_p}, \text{A} \quad (4.4)$$

Таблица 4.1 – Параметры цепи и результаты расчета максимума энергии разряда в зависимости от значений тока I_1 (I_{11m} , I_{12m} , I_{13m})

U , В	L , мкГн	R , Ом	I , А	I_{11m} , А	I_{12m} , А	I_{13m} , А	W_{11m} , мДж	W_{12m} , мДж	W_{13m} , мДж	T_p , мкс
36	100	20	3,3	0,55	0,9	0,02	1,465	1,476	1,407	6

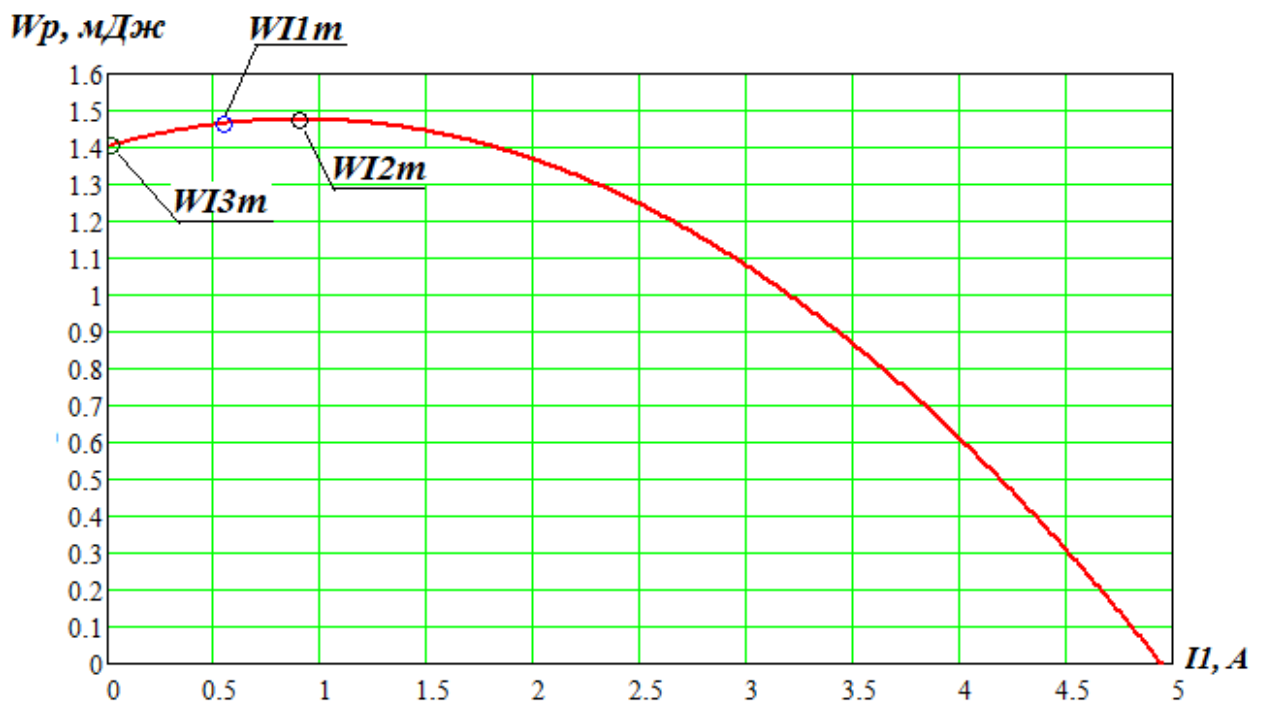


Рисунок 4.4 – Зависимость энергии в разряде W_p от тока обрыва дуги I_1 с указанием различных вариантов его определения

Из полученной зависимости (рисунок 4.4) следует, что максимальное значение энергии разряда W_p при расчете достигается с током обрыва дуги I_1 , полученным согласно (4.4). Данный способ расчета необходимо учитывать при определении выделенной энергии разряда.

Минимальная допустимая энергия воспламенения $W_{доп}$ в зависимости от длительности разряда для диапазона $T_p < 44$ мкс может приниматься согласно известного выражения (4.5) Бершадского И.А.

$$W_{\text{доп}} = 5,804 \cdot (T_p)^{-0,718} \cdot 10^{-3} \quad (4.5)$$

На допустимую суммарную мощность светильников оказывают влияние не только напряжение цепи и ток в нагрузке, но и индуктивность L и сопротивление R питающей линии, длиной Dl , длительность разряда T_p , которые в совокупности и определяют энергию искрового разряда.

Оценка параметров контрольных гибких шахтных кабелей от ряда производителей стран СНГ и Европы показала их незначительные отличия [98]. Исходя из чего, в таблице 4.2 приведены параметры наиболее применяемого в угольной отрасли ДНР контрольного гибкого шахтного кабеля марки КГВШ (ТУ У 31.3-31850229-020:2006) [99].

Таблица 4.2 – Удельные параметры контрольного кабеля КГВШ

Сечение медного кабеля F , мм ²	Удельное сопротивление $r_{\text{уд}}$, Ом/км при 20° С	Удельная индуктивность $L_{\text{уд}}$, мкГн/м	Удельная емкость $C_{\text{уд}}$, нФ/м
2,5	7,41	0,38	0,23
4	4,61	0,35	0,26
6	3,025	0,31	0,28
7,5	2,47	0,28	0,29
8	2,305	0,26	0,3

Суммарное сопротивление и индуктивность кабельной линии:

$$R_j = \frac{r}{1000} \cdot Dl + \frac{U_j}{I_j}, \text{ Ом} \quad (4.6)$$

$$L = L_{\text{уд}} \cdot Dl \cdot 10^{-6}, \text{ Гн} \quad (4.7)$$

где $j=1..5$, $U_j = 12 \cdot j$ – ряд напряжений источника питания, В; $I_j = P/U_j$ – ряд токов в нагрузке, А; Dl – общая длина кабеля, м; $r_{\text{уд}}$ – удельное сопротивление (таблица 4.2), $L_{\text{уд}}$ – удельная индуктивность (таблица 4.2).

Исследования влияния индуктивности кабеля на искробезопасность источников питания с динамической защитой [100] показали, что

воспламеняющая способность разряда в таких цепях максимальна при равенстве времен срабатывания защиты источника ($T_{и}$) и длительности разряда T_p . При срабатывании защиты в момент начала разряда $T_{и} \leq 10$ мкс и увеличении сопротивления источника питания в 10 раз по отношению к сопротивлению кабельной линии, разряд прекращается непосредственно в момент размыкания [101]. Таким образом, при расчете энергии разряда (4.2), значения его длительности T_p правомерно заменять временем срабатывания источника питания $T_{и}$.

Определим значение длины кабельной линии Dl освещения очистного забоя, протяженностью $D=300$ м с учетом запаса на перемещение крепи. Исходя из значения шага перемещения секции крепи ДМ 0,7 м, запас кабеля на 3 секции должен быть не менее 1,4 м, соответственно длина кабельной линии Dl - не менее 400 м.

Влияние основных параметров искробезопасного источника питания (ИИП) и кабельной линии на уровень взрывобезопасности осветительной установки для заданных условий эксплуатации определяется из выражения (4.2) с учетом (4.4) по воспламеняющей способности искр, возникающих при коммутации электрических цепей с реактивными элементами.

Пример построения зависимостей W_p , Дж (ее максимум соответствует W_{12m}), $W_{доп}$ (U , T_p) для электрических цепей с параметрами $F=6$ мм², $Dl=400$ м, $P=P_{сум}/3=408/3=136$ Вт, L и R – согласно выражений (4.6) и (4.7), $k=1..25$, $T_p = k$ мкс показан на рисунок 4.5. Значения W_{12m} (U , T_p), $W_{доп}$ (U , T_p) приведены в таблице 4.3.

Таким образом, допустимое множество U , T_p с точки зрения искробезопасности находится в области, где соблюдается условие $W_{доп} - W_{12m} \geq 0$.

По данным рисунка 4.5 и таблицы 4.3 для различных уровней напряжений выявлены параметры быстрогодействия источника питания с динамической защитой - допустимые граничные значения времени его срабатывания (длительность разряда T_p).

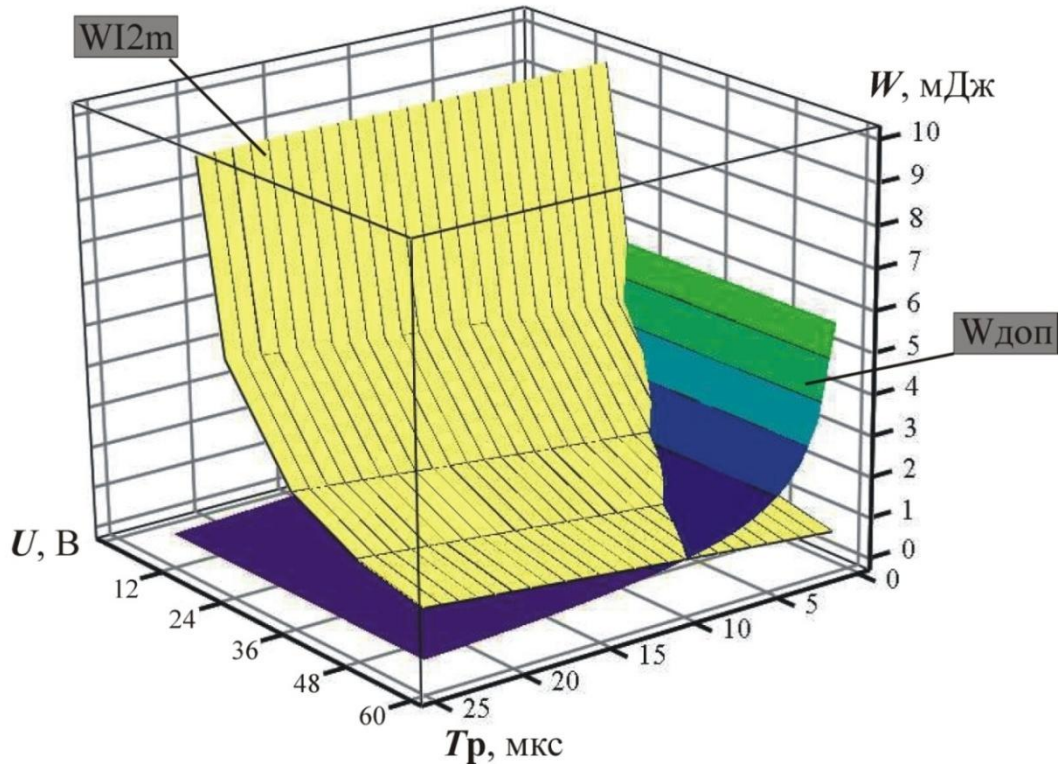


Рисунок 4.5 - Зависимости величины максимума энергии разряда (W_{12m}) и минимальной допустимой энергии воспламенения ($W_{\text{доп}}$) от напряжения источника питания (U) и длительности разряда (T_p)

Таблица 4.3 – Сравнение энергий W_{12m} и $W_{\text{доп}}$ в зависимости от длительности разряда T_p и напряжения U , кратное 12 В

Длительность разряда T_p , мкс	Энергия разряда W_{12m} , мДж при напряжениях источника питания U					Минимально допустимая энергия $W_{\text{доп}}$, мДж
	12 В	24 В	36 В	48 В	60 В	
1	18	4,514	2,025	1,154	0,751	5,804
2	18	4,548	2,06	1,189	0,786	3,528
3	18	4,583	2,095	1,225	0,822	2,637
4	18	4,619	2,131	1,261	0,858	2,145
5	18	4,655	2,167	1,297	0,895	1,828
6	18	4,691	2,203	1,334	0,932	1,603
7	18	4,727	2,239	1,371	0,969	1,435
8	18	4,764	2,276	1,408	1,007	1,304
9	18	4,801	2,313	1,445	1,045	1,198
10	18	4,838	2,351	1,483	1,083	1,111
11	18	4,875	2,388	1,52	1,121	1,038
12	18	4,913	2,426	1,558	1,159	0,974

Аналогичным образом дополнительно выявлены и приведены в таблице 4.4 допустимые граничные значения времени срабатывания источника питания (длительность разряда T_p) с учетом кабельной линии для сечений $F=2,5 \text{ мм}^2$ и 4 мм^2 , 6 мм^2 , $7,5 \text{ мм}^2$, 8 мм^2 при $DI=400 \text{ м}$, $P=136 \text{ Вт}$, $P=204 \text{ Вт}$, $P=408 \text{ Вт}$.

Таблица 4.4 – Результаты расчетов

Мощность канала P , Вт	Напряжение U , В	Допустимая энергия $W_{\text{доп}}$, мДж	Максимальная энергия разряда $W_{12\text{м}}$, мДж	Граничная длительность разряда T_p , мкс
$F=2,5 \text{ мм}^2, 4 \text{ мм}^2, 6 \text{ мм}^2, 7,5 \text{ мм}^2, 8 \text{ мм}^2$				
408	12	-	-	-
	24	-	-	-
	36	-	-	-
	48	-	-	-
	60	-	-	-
$F=2,5 \text{ мм}^2, 8 \text{ мм}^2$				
204	12	-	-	-
	24	-	-	-
	36	5,804	5,543	1
	48	3,528	3,193	2
	60	2,637	2,135	3
$F=4 \text{ мм}^2, 6 \text{ мм}^2, 7,5 \text{ мм}^2$				
204	12	-	-	-
	24	-	-	-
	36	5,804	5,543	1
	48	3,528	3,193	2
	60	2,145	2,033	4
$F=2,5 \text{ мм}^2$				
136	12	-	-	-
	24	5,804	5,525	1
	36	2,637	2,546	3
	48	1,603	1,59	6
	60	1,304	1,172	8
$F=4 \text{ мм}^2$				
136	12	-	-	-
	24	5,804	5,092	1
	36	2,637	2,352	3
	48	1,603	1,479	6
	60	1,198	1,138	9

Окончание таблицы 4.4 – Результаты расчетов

Мощность канала P , Вт	Напряжение U , В	Допустимая энергия $W_{\text{доп}}$, мДж	Максимальная энергия разряда $W_{12\text{м}}$, мДж	Граничная длительность разряда T_p , мкс
$F=6 \text{ мм}^2$				
136	12	-	-	-
	24	5,804	4,514	1
	36	2,145	2,131	4
	48	1,435	1,371	7
	60	1,111	1,083	10
$F=7,5 \text{ мм}^2$				
136	12	-	-	-
	24	5,804	4,08	1
	36	2,145	1,938	4
	48	1,304	1,299	8
	60	1,111	1,014	10
$F=8 \text{ мм}^2$				
136	12	-	-	-
	24	5,804	3,791	1
	36	2,145	1,809	4
	48	1,304	1,224	8
	60	1,038	1,001	11

Оценку искробезопасности осветительной установки путем расчета энергии разряда по выражению (4.2) с учетом (4.4) при определении влияния нескольких параметров разработчику неудобно. В этом случае необходимо находить несколько зависимостей $W_p(U, T_p)$, $W_p(U, I)$, $W_p(I, L)$ и т.д. Для устранения данного недостатка получены зависимости $I(U, T_p, L)$ по выражению (4.2), с учетом (4.4) для напряжений 30В, 40В, 50В, 60В, 70В, 80В, 90В, времени срабатывания источника питания $T_{\text{и}}$ от 1 до 15 мкс, индуктивностей L от 30 мкГн до 5 мГн, при которых выполняется граничное условие искробезопасности $W_{\text{доп}} - W_{12\text{м}} = 0$ с учетом коэффициента 1,5 (Приложение Г, рисунки 4.6, 4.7).

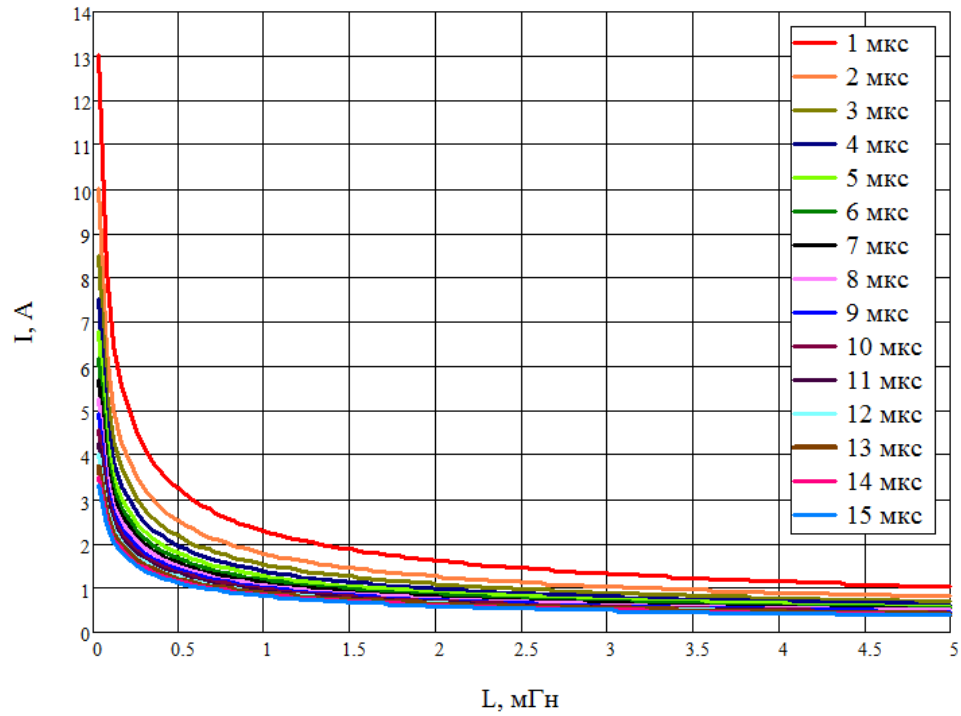


Рисунок 4.6 – Зависимости искробезопасного тока при напряжении цепи 30 В от времени срабатывания 1 мкс...15 мкс и индуктивности 30 мкГн...5 мГн

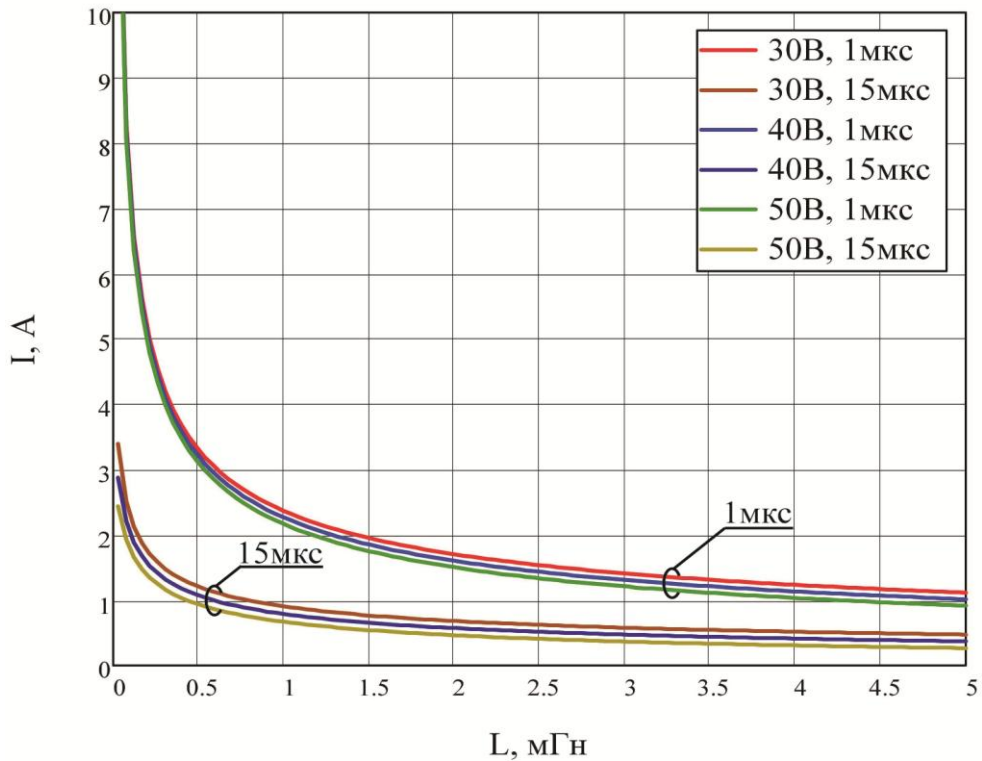


Рисунок 4.7 – Зависимости искробезопасного тока от времени срабатывания источника питания $T_{и}$ для 1 мкс и 15 мкс, индуктивности L от 30 мкГн до 5 мГн для напряжений 30В, 40В, 50В

Для массивов полученных данных I и L найдены аналитические зависимости $I(L, T_{и}, U)$ путем аппроксимации регрессионными уравнениями степенной функции $y(x)=a \cdot x^b+c$ (Приложение Г). Определены аналитические зависимости коэффициентов аппроксимации с помощью наиболее подходящих регрессионных уравнений. Увеличение точности аппроксимации, выраженной через коэффициент корреляции, достигнуто путем разделения массивов данных на диапазоны напряжений 30-50В, 50-70В и 70-90. Точность аппроксимации (коэффициент корреляции) для всех уравнений составляет 1.

Полученные уравнения регрессии и их коэффициенты, связывающие искробезопасный ток, время срабатывания источника питания, напряжение цепи и индуктивность нагрузки приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Искробезопасный ток в зависимости от напряжения цепи U , времени срабатывания источника питания $T_{и}$ (мкс) и индуктивности нагрузки L (мкГн)

$U, В$	Значения коэффициентов уравнения регрессии
30-50	$a1_{30_50}(U) = 1.35 \cdot 10^3 \cdot \ln(U) - 460.45 \cdot \sqrt{U} - 1.81 \cdot 10^3$
	$b1_{30_50}(U) = 0.32 \cdot \ln(U) - 9.8410^3 \cdot U - 0.89$
	$c1_{30_50}(U) = -404.71 \cdot \sqrt{U} + 34.43 \cdot U + 986.94$
	$a2_{30_50}(U) = 0.01 \cdot \ln(U) - 0.01 \cdot \sqrt{U} + 6.91 \cdot 10^{-4} \cdot U$
	$b2_{30_50}(U) = 0.06 \cdot \sqrt{U} - 8.86 \cdot 10^{-3} \cdot U + 1.42$
	$c2_{30_50}(U) = 0.02 \cdot \ln(U) - 8.09 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{U} - 0.53$
	$a3_{30_50}(U) = -0.02 \cdot \ln(U) + 5.59 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{U} + 0.02$
	$b3_{30_50}(U) = -0.36 \cdot \sqrt{U} + 0.04 \cdot U + 2.14$
	$c3_{30_50}(U) = 0.11 \cdot \ln(U) - 0.04 \cdot \sqrt{U} - 0.14$
	$a_{30_50}(T_{и}, U) = a1_{30_50}(U) \cdot T_{и}^{b1_{30_50}(U)} + c1_{30_50}(U)$
$b_{30_50}(T_{и}, U) = a2_{30_50}(U) \cdot T_{и}^{b2_{30_50}(U)} + c2_{30_50}(U)$	

Продолжение таблицы 4.5 - Искробезопасный ток в зависимости от напряжения цепи U , времени срабатывания источника питания $T_{и}$ (мкс) и индуктивности нагрузки L (мкГн)

U , В	Значения коэффициентов уравнения регрессии
30-50	$c_{30_50}(T_{и}, U) = a_{30_50}(U) \cdot T_{и}^{b_{30_50}(U)} + c_{30_50}(U)$
	$I(L, T_{и}, U) = a_{30_50}(T_{и}, U) \cdot L^{b_{30_50}(T_{и}, U)} + c_{30_50}(T_{и}, U)$
50-70	$a_{1_{50_70}}(U) = -543.54 \cdot \ln(U) + 87.16 \cdot \sqrt{U} + 1.73 \cdot 10^3$
	$b_{1_{50_70}}(U) = 0.26 \cdot \ln(U) - 8.53 \cdot 10^{-3} \cdot U - 0.7$
	$c_{1_{50_70}}(U) = 195.33 \cdot \sqrt{U} - 9.17 \cdot U - 1.08 \cdot 10^3$
	$a_{2_{50_70}}(U) = -1.36 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{U} + 3.03 \cdot 10^{-4} \cdot U$
	$b_{2_{50_70}}(U) = -4.48 \cdot 10^{-3} \cdot U + 1.63$
	$c_{2_{50_70}}(U) = -2.17 \cdot 10^{-4} \cdot U - 0.49$
	$a_{3_{50_70}}(U) = 8.93 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(U) - 9.27 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{U} + 5.47 \cdot 10^{-4} \cdot U$
	$b_{3_{50_70}}(U) = 7.66 \cdot \ln(U) - 6.04 \cdot \sqrt{U} + 0.29 \cdot U$
	$c_{3_{50_70}}(U) = -0.39 \cdot \ln(U) + 0.33 \cdot \sqrt{U} - 0.02 \cdot U$
	$a_{50_70}(T_{и}, U) = a_{1_{50_70}}(U) \cdot T_{и}^{b_{1_{50_70}}(U)} + c_{1_{50_70}}(U)$
	$b_{50_70}(T_{и}, U) = a_{2_{50_70}}(U) \cdot T_{и}^{b_{2_{50_70}}(U)} + c_{2_{50_70}}(U)$
	$c_{50_70}(T_{и}, U) = a_{3_{50_70}}(U) \cdot T_{и}^{b_{3_{50_70}}(U)} + c_{3_{50_70}}(U)$
	$I(L, T_{и}, U) = a_{50_70}(T_{и}, U) \cdot L^{b_{50_70}(T_{и}, U)} + c_{50_70}(T_{и}, U)$
70-90	$a_{1_{70_90}}(U) = -139.02 \cdot \sqrt{U} + 5.88 \cdot U + 904.74$
	$b_{1_{70_90}}(U) = 0.22 \cdot \sqrt{U} - 0.02 \cdot U - 0.81$
	$c_{1_{70_90}}(U) = 139.12 \cdot \sqrt{U} - 5.91 \cdot U - 834.15$
	$a_{2_{70_90}}(U) = 0.03 \cdot \ln(U) - 0.02 \cdot \sqrt{U} + 1.25 \cdot 10^{-3} \cdot U$
	$b_{2_{70_90}}(U) = 1.33 \cdot \ln(U) - 0.64 \cdot \sqrt{U} + 0.02 \cdot U$

Окончание таблицы 4.5 - Искробезопасный ток в зависимости от напряжения цепи U , времени срабатывания источника питания $T_{и}$ (мкс) и индуктивности нагрузки L (мкГн)

U , В	Значения коэффициентов уравнения регрессии
70-90	$c_{2_{70_90}}(U) = -3.11 \cdot 10^{-4} \cdot U - 0.48$
	$a_{3_{70_90}}(U) = 0.03 \cdot \ln(U) - 3.66 \cdot 10^{-4} \cdot U - 0.12$
	$b_{3_{70_90}}(U) = -35.28 \cdot \ln(U) - 0.53 \cdot U + 115.29$
	$c_{3_{70_90}}(U) = 1.62049 \cdot \ln(U) - 0.02474 \cdot U - 5.20356$
	$a_{70_90}(T_{и}, U) = a_{1_{70_90}}(U) \cdot T_{и}^{b_{1_{70_90}}(U)} + c_{1_{70_90}}(U)$
	$b_{70_90}(T_{и}, U) = a_{2_{70_90}}(U) \cdot T_{и}^{b_{2_{70_90}}(U)} + c_{2_{70_90}}(U)$
	$c_{70_90}(T_{и}, U) = a_{3_{70_90}}(U) \cdot T_{и}^{b_{3_{70_90}}(U)} + c_{3_{70_90}}(U)$
	$I(L, T_{и}, U) = a_{70_90}(T_{и}, U) \cdot L^{b_{70_90}(T_{и}, U)} + c_{70_90}(T_{и}, U)$

Результаты исследования оценки достоверности расчетных значений искробезопасного тока с помощью уравнений регрессии (таблица 4.5) и значений согласно выражению (4.2) с учетом (4.4) приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Сравнение результатов расчета искробезопасного тока по уравнениям регрессии (I_p) и исходного уравнения (I)

U , В	$T_{и}$, мкс	L , мкГн	L_p , А	I , А по (4.2, 4.4)	Погрешность δ , %
30	1	30	12,95	13	0,4
30	15	5000	0,37	0,36	2,7
36	1	152 (2,5мм ²)	5,83 (209Вт)	5,67 (204Вт)	2,8
36	4	124 (6 мм ²)	3,83 (137Вт)	3,78 (136Вт)	1,32
40	12	582	1,11	1,12	0,9

Окончание таблицы 4.6 - Сравнение результатов расчета искробезопасного тока по уравнениям регрессии (I_p) и исходного уравнения (I)

U , В	$T_{и}$, мкс	L , мкГн	L_p , А	I , А по (4.2, 4.4)	Погрешность δ , %
48	6	152 (2,5мм ²)	2,82 (135,4Вт)	2,83(135 Вт)	0,4
50	10	2791	0,59	0,57	3,5
60	5	30	6,18	6,17	0,2
70	1	2239	1,46	1,51	3,3
80	5	1134	1,21	1,16	4,3
90	3	582	1,8	1,9	5

Результаты таблицы 4.6 показывают удовлетворительную сходимость с данными, полученными по выражению 4.2.

Время срабатывания динамической искрозащиты с учетом подключенной кабельной линией [102]:

$$T_{и} = T_{в} + T_{з} + T_{ф}, \text{ мкс} \quad (4.8)$$

где $T_{и}$ - время срабатывания источника питания с динамической защитой, $T_{в}$ - время срабатывания исполнительного элемента искрозащиты, $T_{з}$ - время запаздывания сигнала начала разряда, $T_{ф}$ - время формирования сигнала начала разряда.

Характеристики современных биполярных и полевых транзисторов, которые целесообразно применять в качестве исполнительного элемента в динамической искрозащите, имеют очень незначительные времена срабатывания порядка 20...50 нс.

Наиболее эффективным устройством контроля начала аварийного разряда в искробезопасных цепях является дроссель, время формирования сигнала у которого составляет 100...150 нс.

Таким образом, определяющим параметром времени срабатывания источника питания с динамической защитой является время запаздывания сигнала

начала разряда, которое определяется через скорость распространения электромагнитной волны:

$$T_3 = Dl \cdot \sqrt{L_{уд} \cdot C_{уд}}, c \quad (4.9)$$

Составляет для кабеля КГВШ при сечениях от 2,5 мм² до 8 мм² (таблица 4.2) не более 3,8 мкс (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Время прохождения сигнала контрольного кабеля КГВШ

Время прохождения сигнала T_3 , мкс для сечений F				
2,5 мм ²	4 мм ²	6 мм ²	7,5 мм ²	8 мм ²
3,74	3,82	3,72	3,6	3,53

Анализируя данные таблицы 4.4 видно, что с величиной времени срабатывания $T_{и} \geq 4$ мкс динамической защиты источника питания возможно обеспечение искробезопасности:

- двумя каналами по 204 Вт, напряжением источника питания 60 В и применением кабеля с сечением не менее 4 мм²;

- тремя каналами по 136 Вт, напряжением источника питания от 48 В при применении кабеля с сечением не менее 2,5 мм² или напряжением источника питания от 36 В при условии применения кабеля с сечением не менее 6 мм².

При выборе напряжения питания для систем освещения целесообразно учитывать влияние действия тока на организм человека. Пороговое значение тока, вызывающее неприятные ощущения нагрева кожи составляет 5-7 мА [103]. Учитывая сопротивление человека 1 кОм и достаточный запас 30 % от нижнего порогового значения тока, максимальное напряжение в цепи должно быть не более 36 В. Стоит отметить, что при напряжении 36 В и сечении 6 мм² разность $W_{доп} - W_{12m}$ стремится к нулю (таблица 4.4), что подчеркивает оптимальность выбранных технических характеристик ИИП для рассматриваемых условий применения.

На основании вышеизложенного, планируемое расположение светильников и распределение нагрузки на каналы, с учетом длины кабельной линии, осуществляется следующим образом (рисунок 4.8).

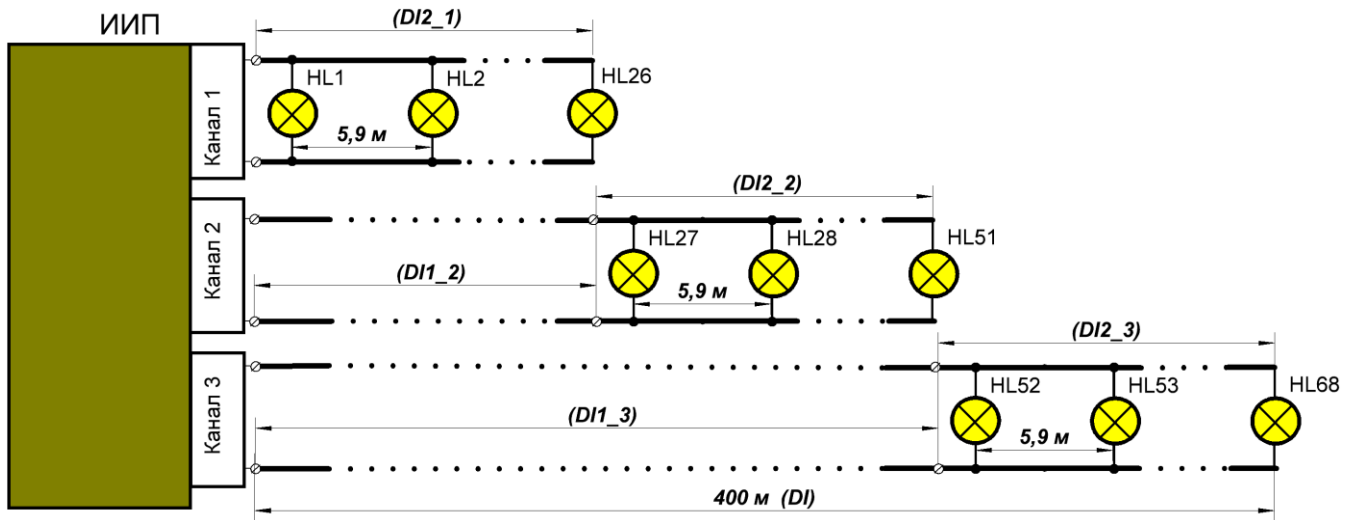


Рисунок 4.8 – Схема подключения светильников системы освещения

Таким образом, расчетным путем определены параметры источника питания: напряжение 36 В, время срабатывания защиты 4 мкс, а также сечение кабеля 6 мм². Для данных параметров, при максимальной длине кабельной линии 400 м, обоснована предельная мощность 136 Вт (таблица 4.4), соответствующая одному из каналов источника питания (канал 3).

Важным параметром, при выборе оптимальных технических характеристик искробезопасных систем освещения протяженных выработок, является учет падения (потери) напряжения в кабельной линии при подключенной нагрузке. Потеря напряжения на участках линии с подключенными светильниками ΔU_j (участок $DI2$) и без них $\Delta U1_j$ (участок $DI1$) определяется по (4.10, 4.11):

$$\Delta U_i = \frac{U_0 - (\Delta U1 + \sum_{i=1}^{N-1} 2 \cdot I_i \cdot r \cdot \frac{DI2}{N})}{U_0} \cdot 100, \% \quad (4.10)$$

$$\Delta U1 = 2 \cdot I_N \cdot r_{уд} \cdot DI1 \quad (4.11)$$

где $i=1 \dots N$; N – максимальное количество светильников на канал, шт;

U_0 – номинальное искробезопасное выходное напряжение холостого хода ИБП, В; $I_i = P_i/U_i$ – ряд токов на локальных участках в кабельной линии между светильниками, А; U_i – ряд напряжений на локальных участках кабельной линии между светильниками с учетом потери напряжения до данного участка, В; $DI1$ – длина кабельной линии без светильников (для канала 1 $DI1=0$), м; $DI2$ – длина кабельной линии с подключенными на одинаковом расстоянии светильниками, м; $r_{уд}$ – удельное сопротивление (таблица 4.2).

Расчеты (таблица 4.7) по уравнениям (таблица 4.5) позволили установить границы допустимой искробезопасной мощности светильников при максимальном уровне напряжения 36 В, длины (рисунок 4.8) и падения напряжения на участках линии со светильниками при номинальном напряжении 34 В с ограничениями: предельное падение $\Delta U \leq 20\%$, $T_p = 4$ мкс, сечения 6 мм², 7,5 мм² и 8 мм². Допустимое множество P находится в области, где соблюдается условие $W_{доп} - W_{12м} \geq 0$.

Таблица 4.7 – Итоговые расчеты

Распределение нагрузки (рисунок 4.8)	Допустимая/ фактическая мощность светильников, Вт	Количество светильников N , шт	Длина участка $DI1/ DI2$, м	Падение напряжения в конце линии ΔU , %
$F=6 \text{ мм}^2$				
Канал 1	192/156	26	0/153,4	6,7
Канал 2	156/150	25	153,4/147,5	19,1
Канал 3	136/102	17	300,9/100,3	19,48
$F=7,5 \text{ мм}^2$				
Канал 1	198/156	23	0/135,7	4,2
Канал 2	168/138	23	135,7/135,7	12,6
Канал 3	138/132	22	271,4/129,8	19,92
$F=8 \text{ мм}^2$				
Канал 1	204/156	23	0/132,7	3,6
Канал 2	168/132	22	132,7/129,8	10,8
Канал 3	144/138	23	262,5/135,7	19,1

Анализ итоговых расчетов показал, что фактические расчетные мощности в каналах при всех рассмотренных сечениях кабеля не достигают граничных искробезопасных значений (оптимальных). При применении кабеля сечением 6 мм² фактическая мощность в двух каналах ограничена критическим падением напряжения в конце линии (20%).

Таким образом, с экономической точки зрения, целесообразно применять кабель сечением 6 мм².

4.2. Разработка схемы источника питания с динамической защитой для системы освещения КУОШ

Принимая во внимание особый интерес внедрения искробезопасных систем освещения для очистных и подготовительных выработок, при разработке схемотехнических решений источника питания важно учитывать некоторые особенности указанных подземных участков угольных шахт, заключающихся в следующем. Для подземных потребителей очистных и подготовительных выработок применяют трёхфазный переменный ток, напряжением 660/1140 В, промышленной частоты 50 Гц [104]. Следовательно, источник питания должен быть рассчитан для подключения к данной сети и состоять из трех функциональных узлов: сетевого трансформатора, преобразователя напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока и барьера искрозащиты (рисунок 4.9).

В разработанной функциональной схеме источника питания учтены специфические требования ИЕС 60079-11 к построению электрических цепей с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь «i»». В частности обеспечено:

- гальваническое разделение искробезопасных цепей от сети за счет трансформатора;
- гальваническое разделение между искробезопасными цепями выходных каналов за счет преобразователей АС/DC, позволяющее использовать

контрольный кабель для подключения всех каналов без дополнительных конструктивных в них мер таких как экранирование, заземление жил.

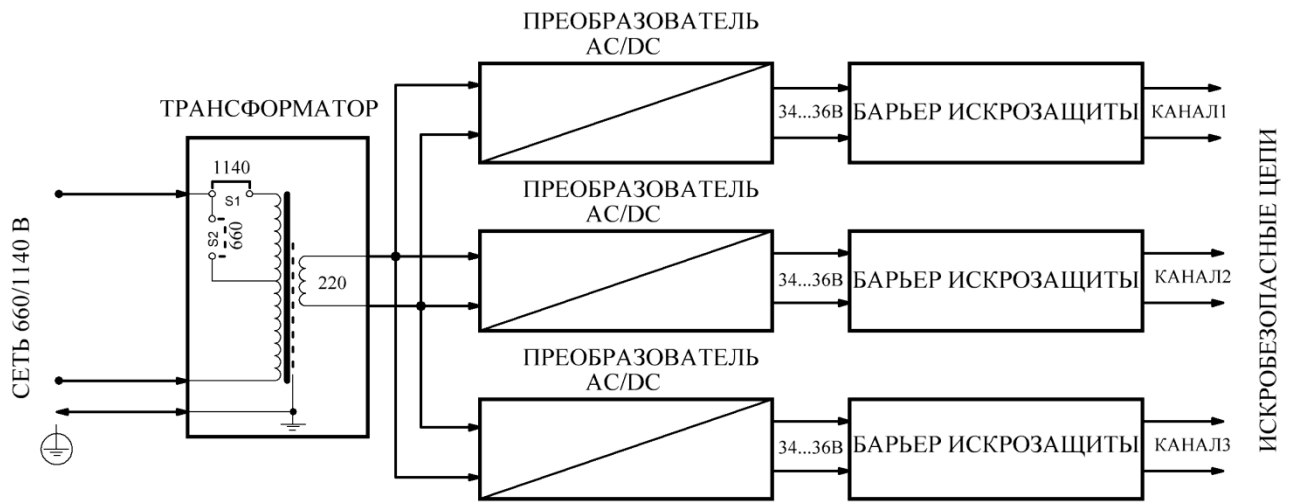


Рисунок 4.9—Функциональная схема источника питания с динамической защитой для системы освещения КУОШ

Стоит отметить, что взрывозащищенные свойства источника питания не ограничиваются только выходными искробезопасными цепями уровня i_b , а дополняются взрывозащитой вида «е» и видом взрывонепроницаемая оболочка «d». Это позволяет обеспечить «высокий» уровень взрывозащиты (табл. 1.2), достаточный для безопасного применения в подземных выработках угольных шахт, опасных по газу и/или пыли.

В функциональной схеме барьера искрозащиты (рисунок 4.9), учтены и реализованы результаты анализа характеристик искробезопасных источников питания систем освещения (п.1.3), заключающиеся в следующем:

- применен способ искусственного сокращения длительности разряда (опережающее отключение), как наиболее эффективный метод увеличения искробезопасной мощности;

- искусственное сокращение длительности разряда основано на принципе отключения (изоляции) цепи питания от участка с разрядом, который

характеризуется наиболее результативным ограничением энергии разряда в случае подключения кабельных линий.

Исходя из нелинейной вольтамперной характеристики барьера искрозащиты, в нем реализованы два защитных узла в соответствии с требованиями IЕС60079-11:

- шунтирующий ограничитель напряжения, который обеспечивает максимальное выходное напряжение U_0 (выделен пунктиром на рисунке 4.10);
- последовательное токоограничительное устройство, которое обеспечивает максимальной ток I_0 .

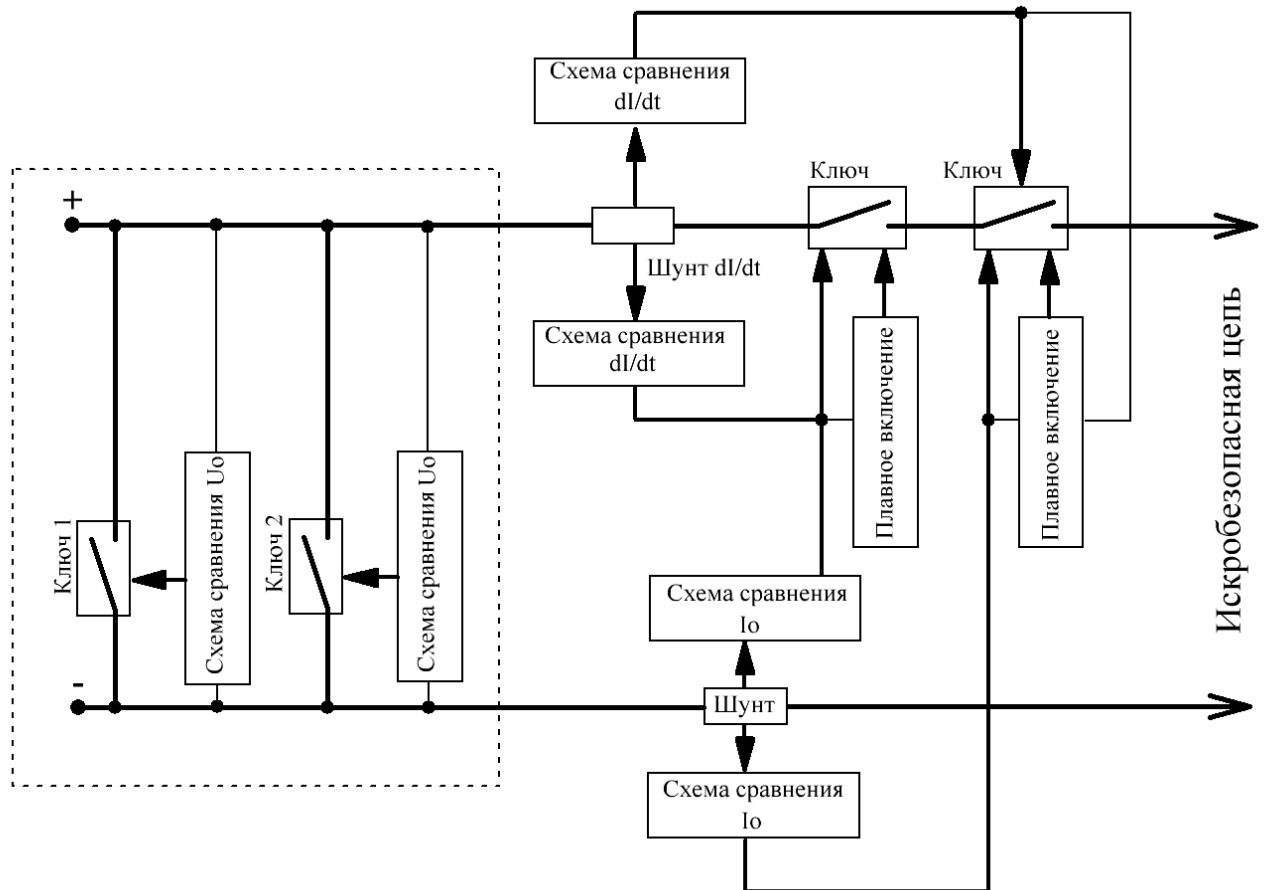


Рисунок 4.10—Функциональная схема барьера искрозащиты источника питания с динамической защитой для системы освещения КУОШ

Шунтирующий ограничитель напряжения.

Ограничение уровня напряжения достигается за счет шунтирования выходной искробезопасной цепи с помощью управляемых полупроводниковых ключей 1 и 2, например, тиристоров. Схемы сравнения U_o формируют сигнал на открытие «снижение сопротивления» ключам при достижении уровня напряжения 36 В в выходной цепи. Быстродействие (время срабатывания тиристоров) ограничения напряжения в аварийном режиме преобразователя AC/DC (рисунок 4.9) при увеличении их управляющего сигнала составляет 3..4 мкс.

В соответствии с требованиями IEC 60079-11 искробезопасные цепи уровня ib не должны вызывать воспламенение при нормальной эксплуатации и введении одного учитываемого и всех неучитываемых повреждений, создающих наиболее опасные условия. В связи с этим в схему введено независимое дублирование узлов.

Последовательное токоограничительное устройство.

Состоит из последовательных управляемых полупроводниковых силовых ключей, шунтов для измерения силы тока нагрузки источника и скорости ее изменения, схем сравнения измеренных параметров тока, а также схем плавного включения.

В качестве управляемых полупроводниковых силовых ключей целесообразно остановиться на полевых или биполярных транзисторах, обеспечивающих приемлемое быстродействие 20...50 нс.

Для определения силы тока нагрузки источника используем резистор (шунт), падение напряжения на котором пропорционально измеряемой величине. В качестве элементов сравнения измеренных значений тока принят биполярный транзистор, включенный по известной схеме на рисунке 1.6, только в минусовой цепи.

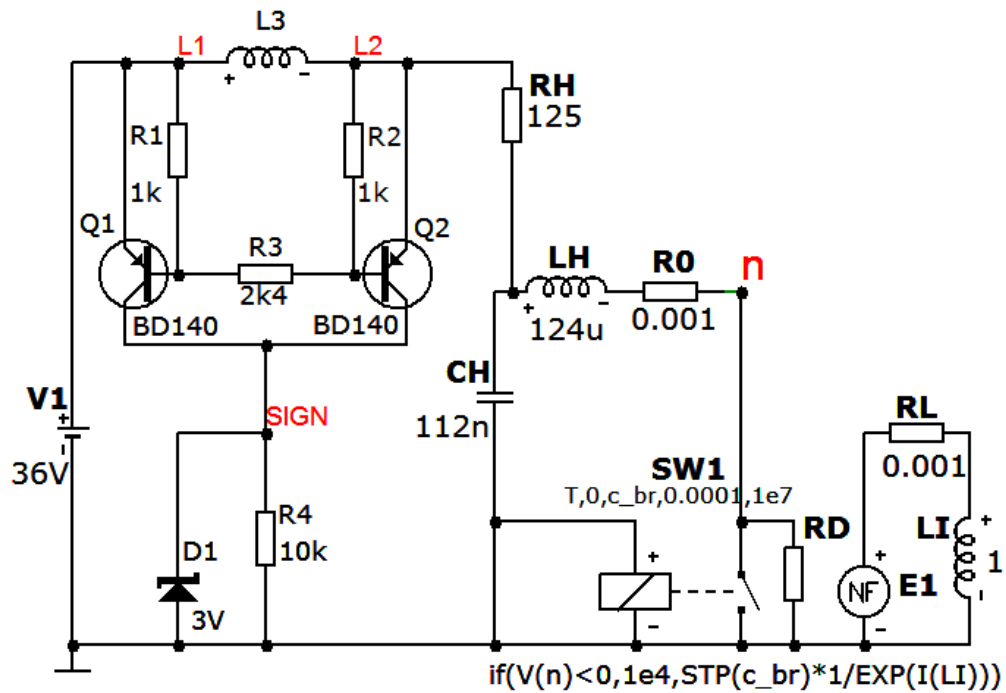
Для обеспечения требуемого ограничения силы тока на заданном уровне используются две независимые схемы сравнения I_o , которые переводят ключи в

линейный режим работы при падении напряжения на шунте 0,5..0,6 В. Соответственно ток уставки определяется соотношением к сопротивлению шунта $I_{уст}=0,6/R_{ш}$. В данном режиме происходит стабилизация (ограничение) силы тока на уровне уставки за счет быстродействующего управления сопротивлением ключей.

Как упоминалось ранее, наиболее эффективным устройством контроля начала аварийного разряда (измерения скорости изменения силы тока) в искробезопасных цепях является дроссель. Анализ способов реализации сравнения сигнала dl/dt показал, что особенно результативным является выделение полезного сигнала на база – эмиттерных переходах биполярных транзистров, подключенных эмиттерами относительно дросселя [105, 106, 107, 108]. Сигнал с шунта подается на отдельные схемы сравнения. При превышении модулем скорости изменения силы тока в нагрузке заданного значения они воздействуют на соответствующие силовые ключи и разрывают цепь питания нагрузки. Для достижения максимальной эффективности динамической искрозащиты при коммутации цепи нагрузки энергия источника питания почти полностью должна рассеиваться на сопротивлениях силовых ключей и минимально выделяться в электрический разряд. Данное условие достигается сокращением времени срабатывания защиты $T_{и}$ (4.8) до нескольких микросекунд.

Известно, что основное влияние кабель оказывает на временные составляющие $T_{и}$ – запаздывание управляющего $T_з$, задержку при формировании на датчике контроля коммутации сигнала о начале разряда $T_{ф}$, а также на амплитуду данного сигнала. Стоит отметить, что последние два фактора зависят от параметров устройства контроля начала аварийного разряда (дросселя).

Определим фактическое время запаздывания $T_з$ и задержки $T_{ф}$ путем моделирования в пакете MicroCap 9.0 с применением модели дугового разряда размыкания (рисунок 4.11).



$$\text{STP}(c_br) * (1/\tau) * ((\text{EXP}(I(LI)) * V(RD))^2) / (I(R0) * (8 + 43.89 * v_s * (T - c_br)) + 5.18 * v_s * (T - c_br)) - 1$$

Рисунок 4.11–Расчетная схема определения задержек и чувствительности динамической искрозащиты при размыкании цепи

Блок питания постоянного тока $V1$ формирует в цепи максимальное напряжение 36В барьера искрозащиты источника питания с динамической защитой для системы освещения КУОШ. Устройство контроля начала аварийного разряда $L3$ с элементами $Q1$, $Q2$, $R1...R3$ выделения и сравнения сигнала с дросселя. Резистор $R4$ предназначен для регистрации управляющего сигнала после сравнения, зашунтированный стабилитроном $D1$ с целью удобства масштабирования данного сигнала на уровне, не более 3В. Модель кабельной линии представлена в виде однозвенной Т-образной схемы замещения с параметрами омического сопротивления (включая нагрузку) RH , индуктивности LH и емкости CH в соответствии с таблицей 4.2 для сечения 6 мм² и длиной 400 м. $SW1$, RD , $R0$, RL , $E1$, LI – элементы модели дугового разряда замыкания, подробно описанная в п.3.1. Учитывая требования ГОСТа [109] чувствительность источников с динамической защитой должна обеспечивать их срабатывание при

параметрах силы тока в соответствии с кривыми IЕС 60079-11. В соответствии с которыми для 36 В максимальный искробезопасный ток составляет 289 мА, что учтено в значении сопротивления $RH=125$ Ом. Исследования проводились с дросселем 47 мкГн, 100 мкГн, 220 мкГн, 470 мкГн. При этом фиксировались переходные процессы на дросселе $L3$ (в узлах $L1$ - $L2$). Результаты представлены на рисунке 4.12.

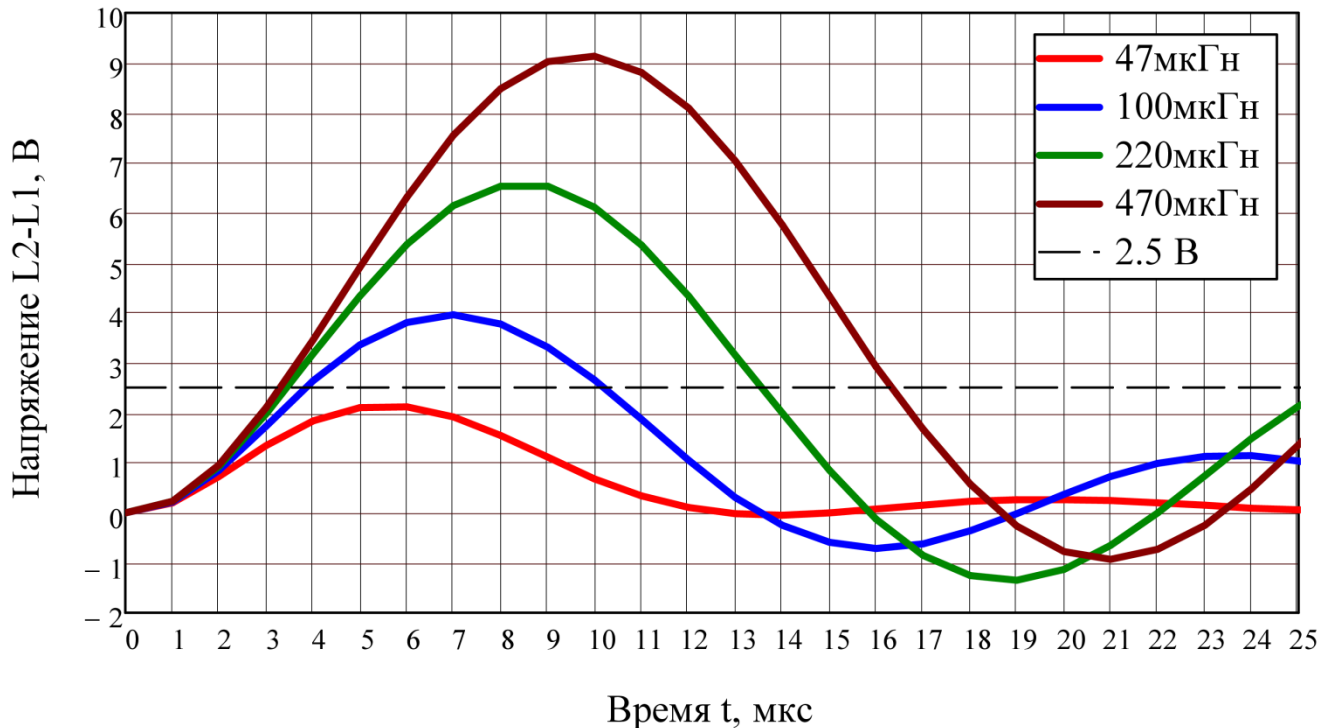


Рисунок 4.12 – Выделяемый сигнал на дросселе $L3$ от времени

Сравнительный элемент схемы (рисунок 4.10) имеет пороговое значение 2,5 В. Результаты моделирования (рисунок 4.12) показывают, что дроссель 47 мкГн не обеспечивает требуемую чувствительность, поскольку уровень выделенного на нем напряжения самоиндукции не достигает порогового значения. Для остальных значений индуктивности необходимая чувствительность обеспечивается, однако суммарное время задержки T_3+T_ϕ уменьшается с ростом значения индуктивности и составляет для 100 мкГн 3,8 мкс, 220 мкГн – 3,4 мкс, 470 мкГн – 3,2 мкс. Таким образом, целесообразно принять значение $L3=220$ мкГн.

Аналогичным способом проверена чувствительность дросселя $L1=220$ мкГн в пакете MicroCap-12 с применением модели дугового разряда замыкания, подробно описанная в п.2.2.

Расчетная схема цепи барьера искрозащиты показана на рисунке 4.13. Цепи дублирования последовательного токоограничительного устройства и шунтирующий ограничитель напряжения не показаны, поскольку в коммутации нагрузки они не участвуют.

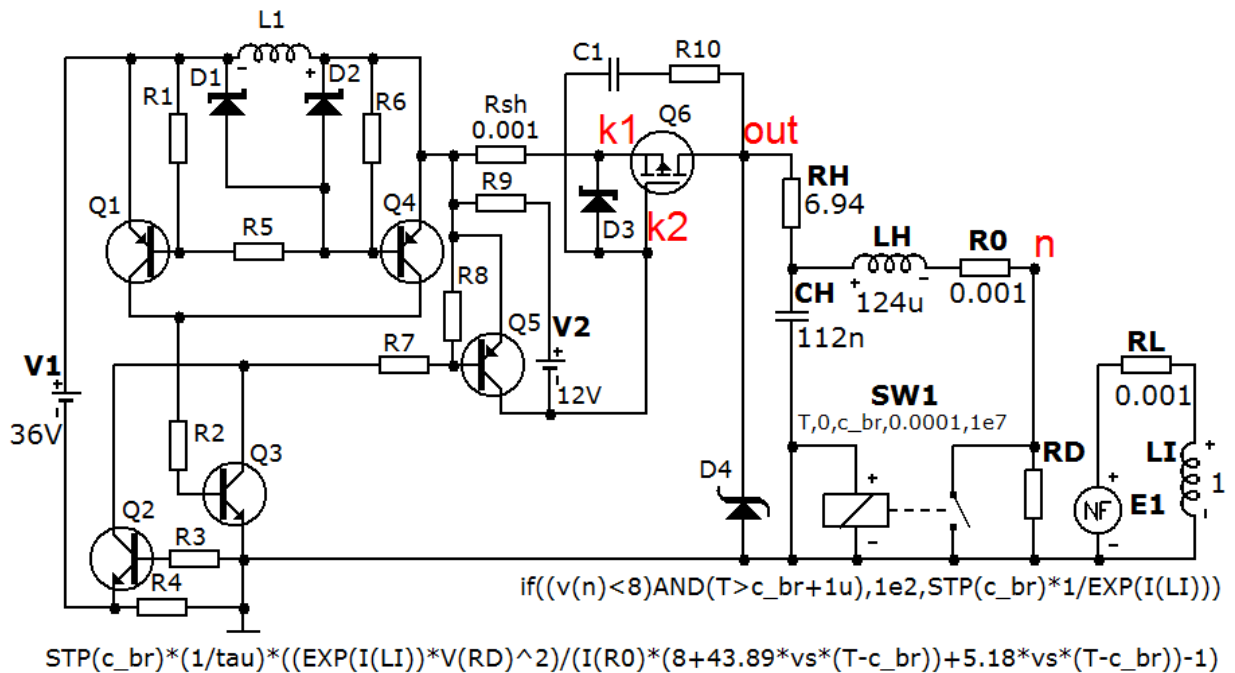


Рисунок 4.13 – Схема расчетная по разрядам размыкания барьера искрозащиты источника питания с динамической защитой для системы освещения КУОШ

В схеме блок питания содержит основной $V1$ (36 В) и вспомогательный источник напряжения $V2$ (12 В) для обособленного питания транзисторного ключа $Q6$. Напряжение основного источника соответствует максимальному значению напряжения U_0 , обеспечиваемого шунтирующим ограничителем.

Транзисторный ключ $Q6$ на полевом MOSFET транзисторе IRF6215 представлен корректной SPICE-моделью. Узел токовой защиты моделируется биполярным транзистором $Q2$ (BD139) и шунтом $R4=0,11$ Ом, рассчитанным на

ток уставки 5 А исходя из максимальной фактической мощности 1 канала 156 Вт для кабеля сечением 6 мм² (таблица 4.7) с учетом +15% запаса на пусковые токи светильников.

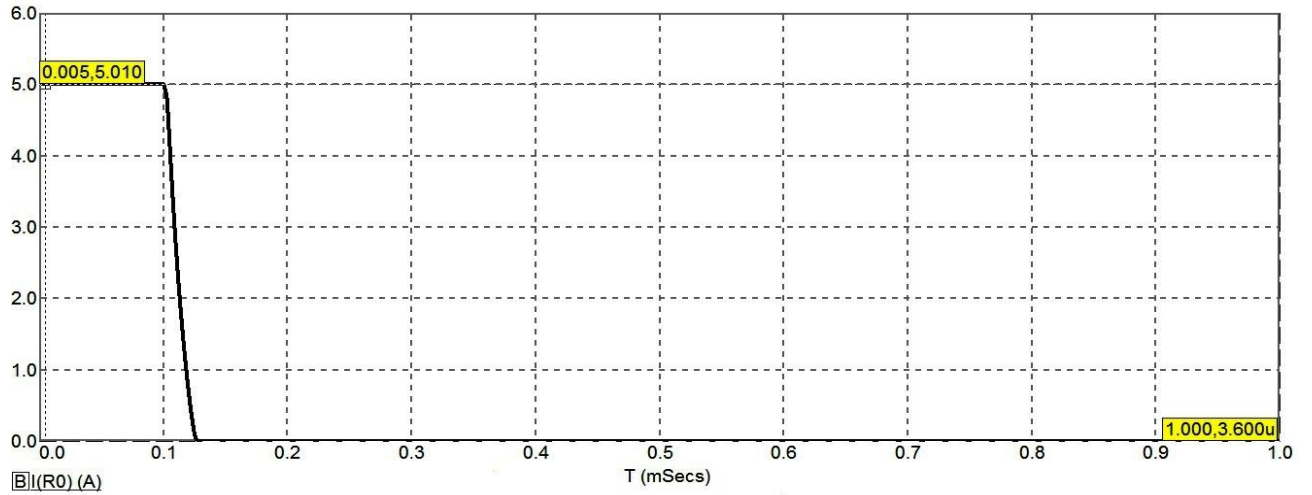
Управление ключом Q6 обеспечивается биполярным транзистором Q5 (BD140). В качестве шунта di/dt применен дроссель L1(220 мкГн), сигнал с которого выделяется по уровню 2,5 В за счет биполярных транзисторов Q1, Q4 (BD140) и резистивных делителей R1, R5, R6. В случае превышения заданного порога независимо от роста или спада силы тока, формируется управляющий сигнал на закрытие ключа Q6 посредством биполярных транзисторов Q3 (BDW93_FC), Q5.

Результаты исследования скорости роста напряжения на разрядах и разработанные рекомендации по ограничению скорости возрастания выходного напряжения искробезопасных источников питания [110] использованы в схеме барьера искрозащиты в виде R-C цепочки (конденсатор C1 и резистор R10).

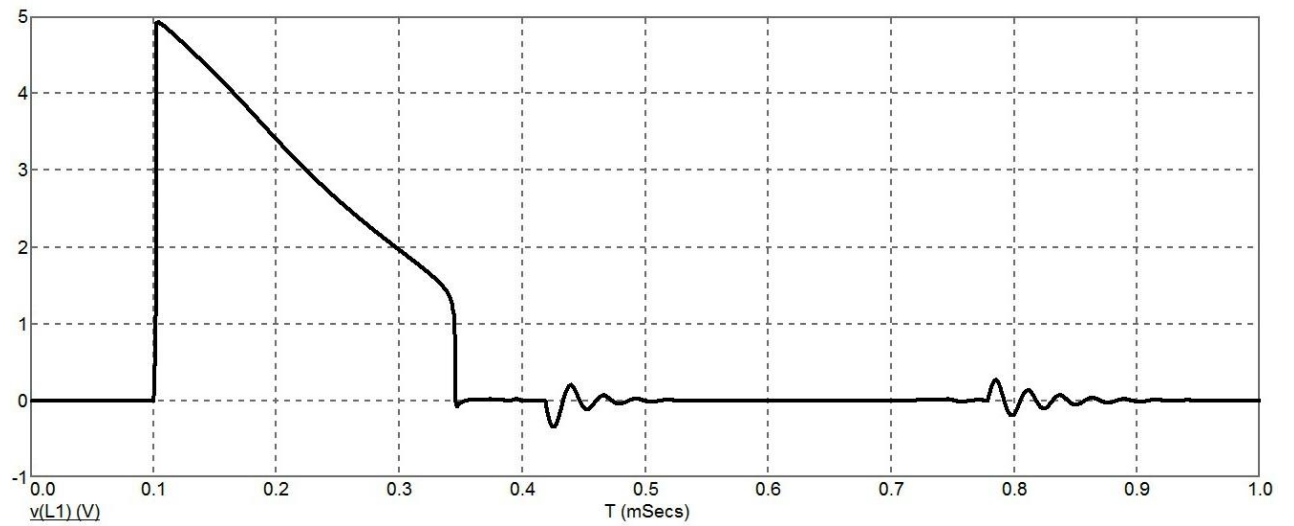
Индуктивно-резистивная нагрузка представлена соответственно элементами LH , RH , CH и отключается в момент времени c_{br} . Модель разряда в цепи представлена блоком дугового размыкания (рисунки 3.2, 3.4). После запуска расчета до момента времени $c_{br}=100$ мкс сопротивление ключа SW1 задано равным 10^{-4} Ом (он замкнут). Через нагрузку протекает ток, силой 5 А ($RH=6,94$ Ом). Начиная с момента времени 100 мкс сопротивление ключа увеличивается до 10^7 Ом за время 4 нс – контакты размыкаются со скоростью 6,5 м/с и остаются в таком состоянии до конца моделирования, при этом в цепь нагрузки вводится сопротивление дугового разряда RD . Диаграммы, характеризующие работу блока искрозащиты, приведены на рисунках 4.14, 4.15.

После отключения тока нагрузки одной из схем сравнения I_0 или di/dt должна обеспечиваться пауза не менее 110 мкс, для обеспечения расхождения контактов на безопасное расстояние. Эта задержка обеспечивается узлом плавного включения. По истечении вышеуказанной паузы, происходит плавное включение силовых ключей со скоростью увеличения силы тока, меньшей, чем порог срабатывания di/dt .

а)



б)



в)

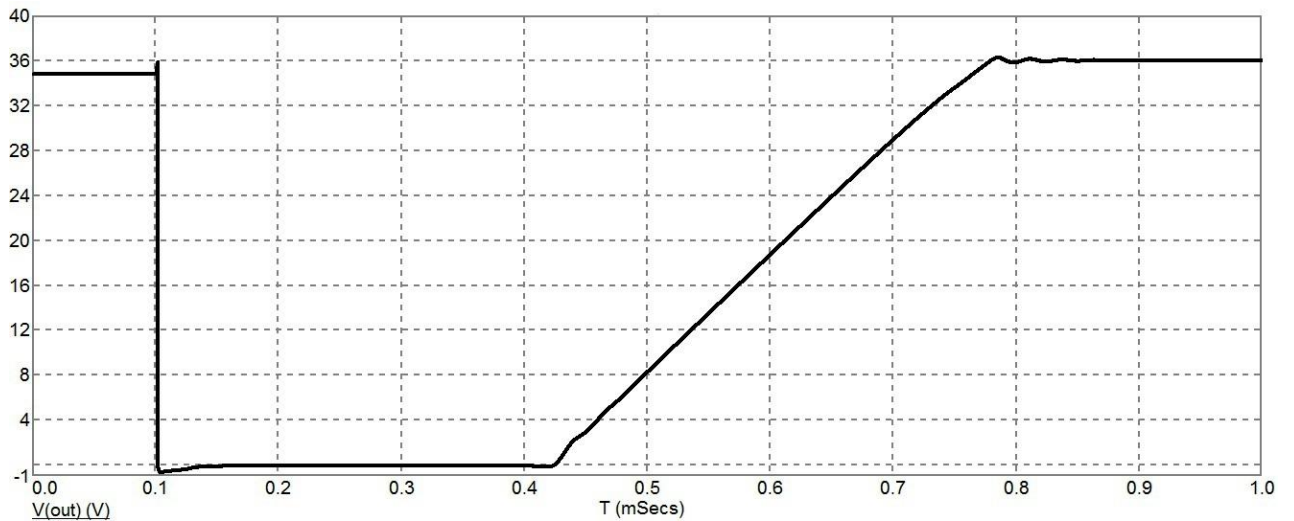


Рисунок 4.14 – Диаграммы, характеризующие работу барьера искрозащиты в режиме коммутации: а) - ток нагрузки $I(R0)$; б) - напряжение на дросселе $V(L1)$; в) - выходное напряжение $V(out)$

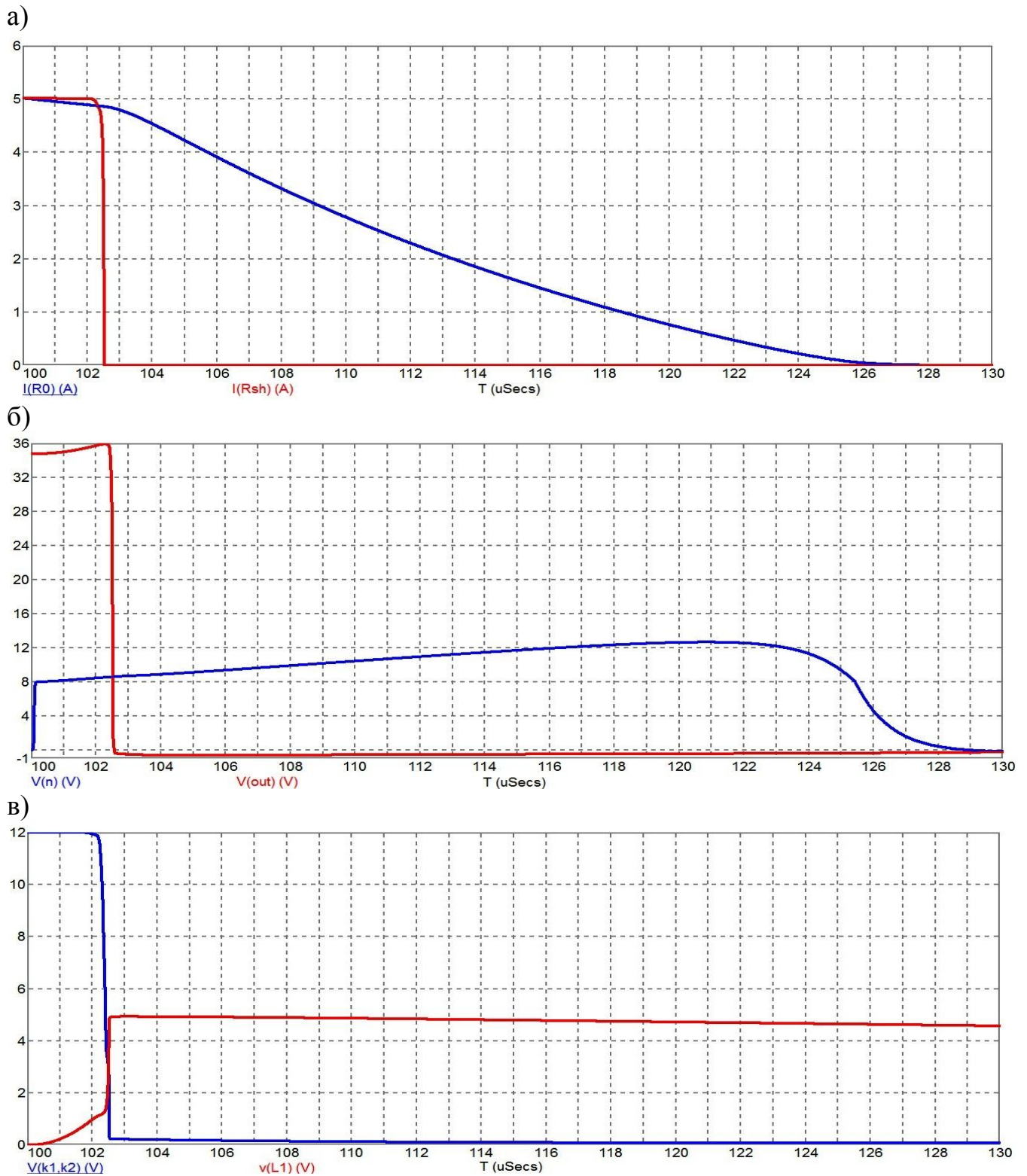


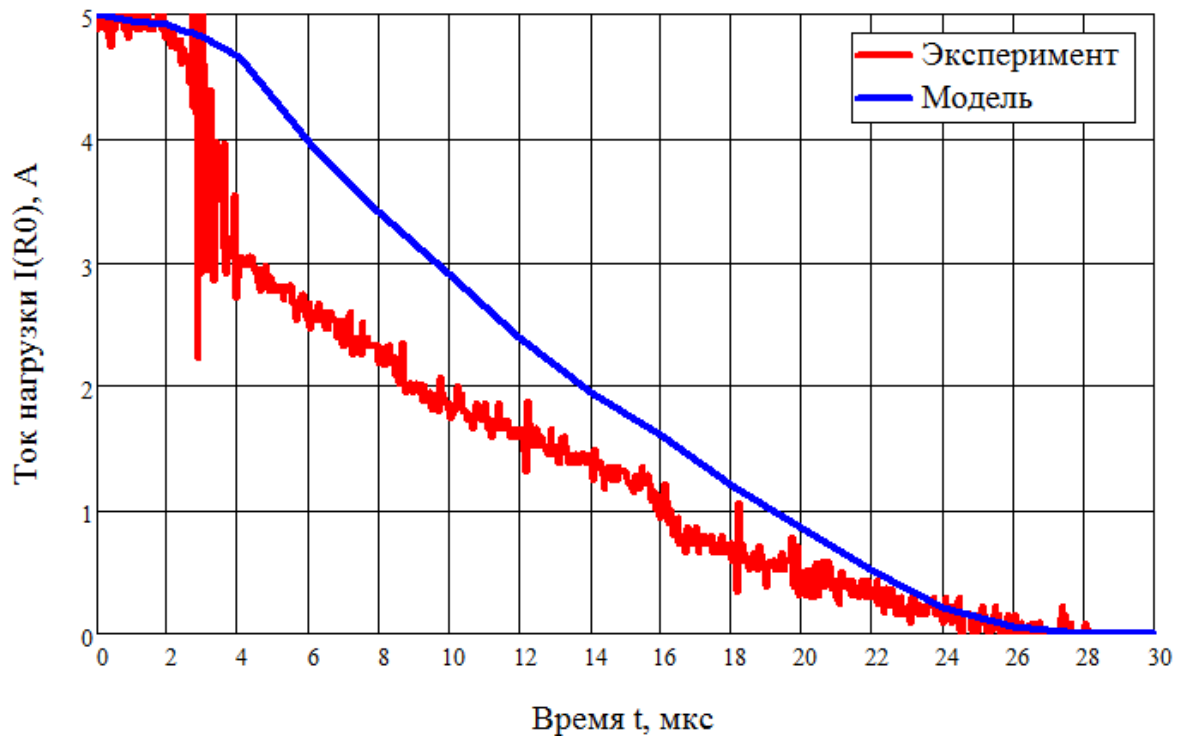
Рисунок 4.15 – Диаграммы, характеризующие работу барьера искрозащиты в режиме коммутации: а) - сила токов нагрузки $I(R0)$ и барьера $I(Rsh)$; б) – напряжения разряда $V(n)$ и на выходе барьера $V(out)$; в) - напряжения управляющего сигнала $V(k1,k2)$ и на дросселе $V(L1)$

Для устойчивой работы барьера искрозащиты в режиме восстановления выходного напряжения в схеме предусмотрена схема плавного включения ключа Q6 (без подрабатывания защиты по скорости изменения силы тока в нагрузке dI/dt), реализованная на элементах C1, R10. После отключения тока нагрузки схемой сравнения dI/dt обеспечивается пауза 320-350 мкс, по истечении которой, происходит плавное нарастание напряжения до установившегося значения 36 В (рисунок 4.14 в). Из рисунка 4.14 б), в) видно, что в переходных процессах напряжения на выходе $V(out)$ и на дросселе $V(L)$ имеются незначительные колебания. Принимая во внимание их частоту, время затухания (менее 100 мкс) и амплитуду отклонения (менее 6%) от установившегося значения, можно сделать вывод о достаточно устойчивой работе схемы барьера искрозащиты при восстановлении. Это подтверждает эффективность работы ограничения скорости возрастания выходного напряжения за счет конденсатора C1 и резистора R10.

Из рисунка 4.15 а) видно, что времена переходных процессов для токов нагрузки и барьера отличаются, и составляют 26 мкс и 2,5 мкс соответственно. В первом случае время определяется постоянной времени электрической цепи нагрузки и дугового разряда $LH/(RH+Rp)$, а во втором – временем срабатывания барьера (рисунок 4.15 в). Незначительное изменение значений тока барьера на уровне начального тока в промежуток времени 2,5 мкс вызвано эффектом самоиндукции дросселя L1, проявляющегося в увеличении напряжения на выходе барьера (рисунок 4.15 б)).

Напряжения на разрядном промежутке $V(n)$ достигает значения катодного падения напряжения $U_k = 8$ В без задержек, что прослеживается на рисунке 4.15 б). За время существования разряда его значение увеличивается до 12,6 В и не достигает уровня напряжения источника питания, чем обеспечивается принцип опережающего отключения (динамической защиты). Сопоставление уровней напряжения на разряде $V(n)$ и времени достижения тока разряда $I(R0)$ значения 20 мА по переходным процессам барьера искрозащиты в режиме коммутации на размыкание (рисунок 4.16) с параметрами нагрузки (рисунок 4.13), показывает хорошую сходимость результатов моделирования и эксперимента.

а)



б)

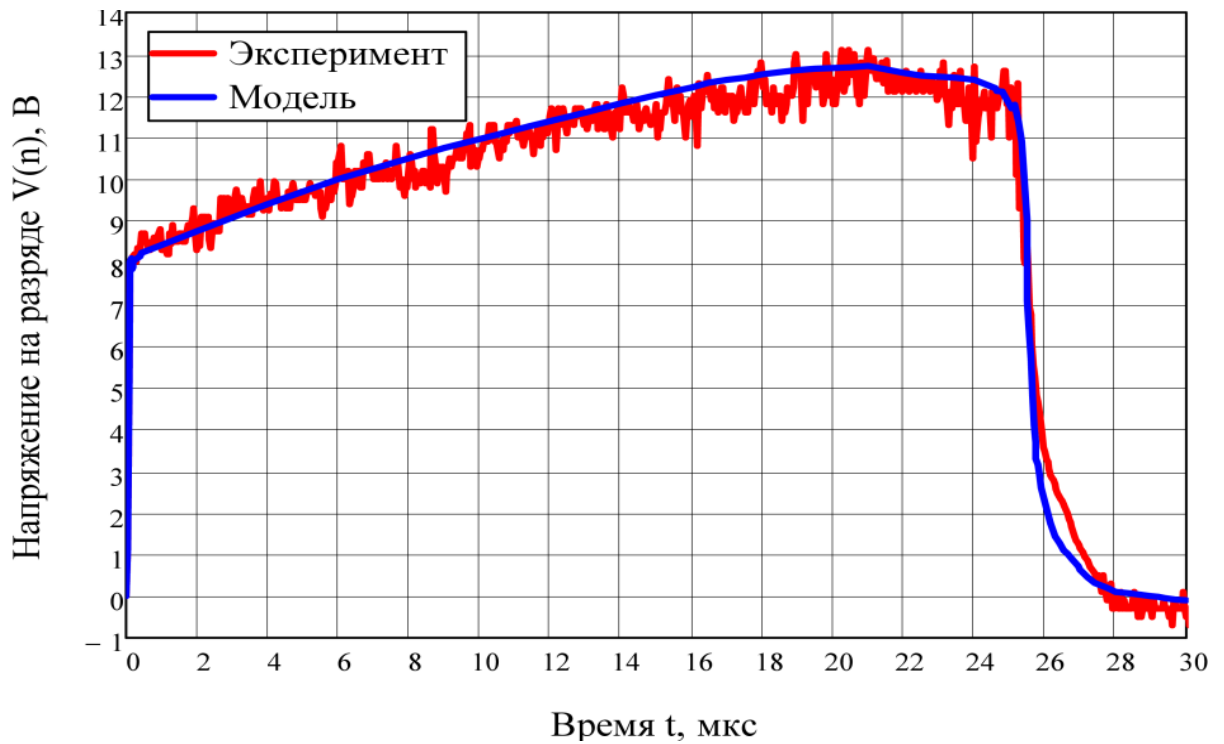
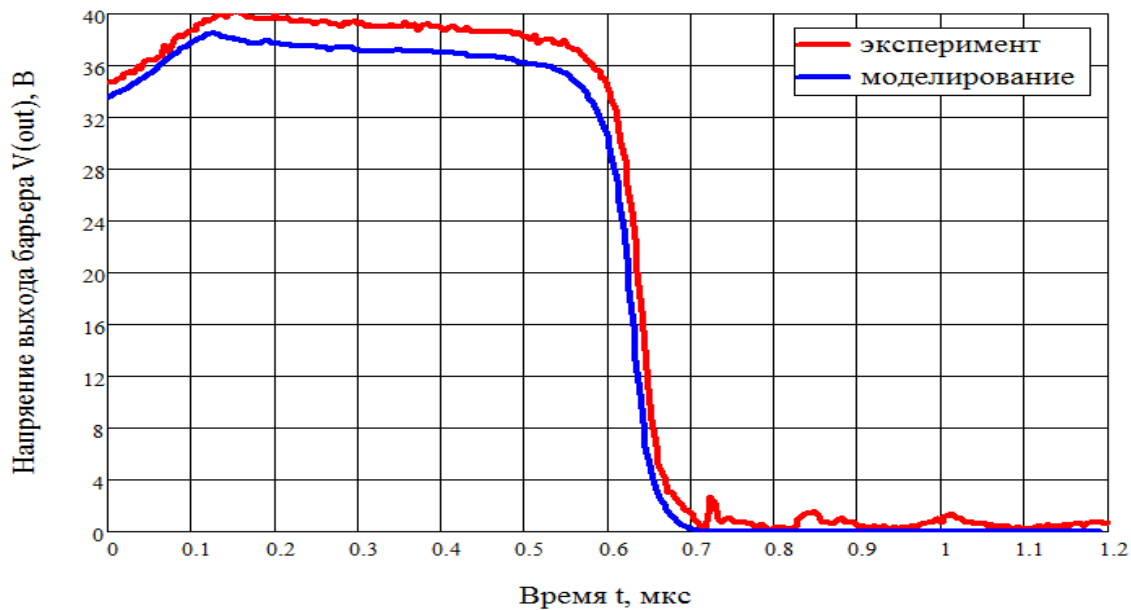


Рисунок 4.16 – Диаграммы силы тока нагрузки $I(R0)$ (а) и напряжения разряда $V(n)$ (б) от времени, полученные путем моделирования и эксперимента (осциллографирования)

На рисунке 4.17 представлены результаты моделирования и осциллографирования напряжения на выходе барьера $V(out)$ (а) и силы тока нагрузки $I(R0)$ от времени в режиме коммутации на размыкание омической цепи с сопротивлением 6,94 Ом. Их анализ не только подчеркивает достаточную сходимость результатов моделирования и эксперимента, но и показывает, что время срабатывания барьера искрозащиты для омических цепей в 3,6 раза меньше, чем для индуктивно-емкостных цепей.

а)



б)

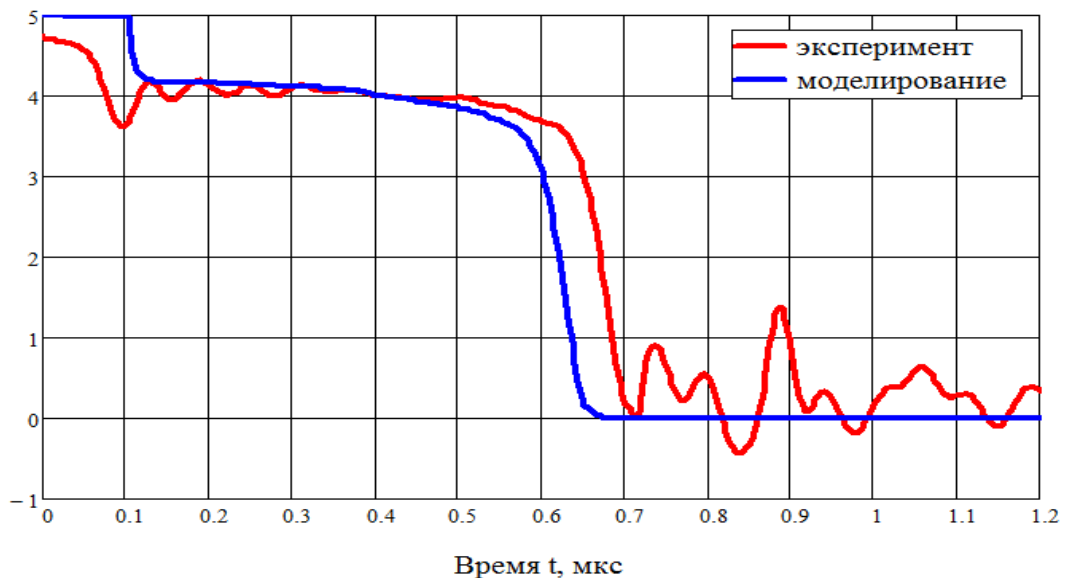


Рисунок 4.17 – Напряжение на выходе барьера $V(out)$ (а) и ток нагрузки $I(R0)$ (б) от времени в режиме коммутации на размыкание омической цепи

Согласно IEC 60079-11 необходимо испытывать искробезопасные цепи с применением коэффициента искробезопасности 1,5, который должен быть обеспечен одним из следующих способов:

а) для индуктивных и резистивных цепей уменьшают сопротивление ограничительного резистора для увеличения силы тока испытываемой цепи в число раз, кратное коэффициенту искробезопасности. Если коэффициент искробезопасности не может быть достигнут таким способом, то увеличивают напряжение;

б) для емкостных цепей напряжение испытываемой цепи увеличивают в число раз, кратное коэффициенту искробезопасности.

При заданном коэффициенте искробезопасности для таких цепей вначале в 1,5 раза увеличивают силу действующего в цепи тока. Определяют индуктивность, при которой установленный в цепи ток становится минимальным воспламеняющим (вызывает воспламенение взрывоопасной смеси с вероятностью 10^{-3}). Затем в 1,5 раза увеличивают напряжение, а силу тока устанавливают равной искробезопасному значению для найденной индуктивности и увеличенного напряжения. После этого проводят испытание цепи на искробезопасность.

Результаты оценки искробезопасности по разрядам размыкания барьера искрозащиты источника питания с динамической защитой для системы освещения КУОШ с параметрами кабельной линии (рисунок 4.13) положительные. Тестирование проводилось с учетом коэффициента искробезопасности $K_i = 1,5$ по силе тока. Получили $I(R0) = 7,504$ А за счет увеличения напряжения источника $U_0 = 54$ В. Т.к уменьшение сопротивления нагрузки влечет за собой изменение постоянной времени электрической цепи и как следствие завышение коэффициента искробезопасности.

Безопасные параметры в результате тестирования составляют: $LH = 124$ мкГн, $CH = 112$ нФ, $T_p = 30,9$ мкс, $W_p = 218,9$ мкДж, $W_{доп} = 478$ мкДж, опасная скорость размыкания $v = 6,5$ м/с. Анализ полученных результатов показывает, что

барьер искрозащиты обеспечивает с запасом искробезопасность с подключенной кабельной линией длиной 400 м и сечением 6 мм².

Предельные безопасные параметры барьера искрозащиты источника питания с динамической защитой для системы освещения КУОШ (рисунок 4.13) составляют при начальном токе цепи $I(R0) = 7,504$ А, напряжении источника $U_0 = 36$ В: $LH = 140$ мкГн, $CH = 126$ нФ, $T_p = 39$ мкс, $W_p = 420$ мкДж, опасная скорость размыкания $v = 6,5$ м/с. Данные параметры эквивалентны кабельной линии 450 м сечением 6 мм². При начальном токе цепи $I(R0) = 7,504$ А, напряжении источника $U_0 = 54$ В: $LH = 173$ мкГн, $CH = 157$ нФ, $T_p = 39,1$ мкс, $W_p = 417$ мкДж, опасная скорость размыкания $v = 6,5$ м/с (таблица 4.8). Данные параметры эквивалентны кабельной линии 560 м сечением 6 мм².

Предельная искробезопасная мощность, рассчитанная для $LH = 140$ мкГн и $LH = 173$ мкГн по уравнениям (таблица 4.5) составляет 157,1 Вт и 141,6 Вт соответственно. При этом погрешность определения предельной искробезопасной мощности по уравнениям (таблица 4.5) и путем моделирования составляет 12,7 % и 21%.

Определим предельные параметры барьера искрозащиты источника питания с динамической защитой для системы освещения КУОШ при подключении резистивно-индуктивной нагрузки при $I(R0) = 7,504$ А, напряжении источника $U_0 = 54$ В. Безопасные параметры в результате тестирования составляют: $LH = 190$ мкГн, $T_p = 40,6$ мкс, $W_p = 391$ мкДж, опасная скорость размыкания $v = 6,5$ м/с (таблица 4.8).

Опасность подключения емкостной нагрузки к барьеру искрозащиты тестировалась согласно расчетной модели (рисунок 4.18).

Ключ $SW1$ в исходном состоянии разомкнут, что обеспечивает заряд конденсатора CH до напряжения источника питания $V1$. Переходный процесс запускается в момент замыкания ключа $c_{br} = 10$ мкс (рисунок 4.18). Дополнительная цепочка VD, Rd, Dd задает предварительный ток через разряд и моделирует возникновение в нем автоэлектронной (фотоэлектронной) эмиссии. Начальное напряжение на разряде уменьшается от значения $V1$ до

установившегося напряжения $U_p=9$ В по экспоненте с постоянной времени 29^{-9} с. Модель SM задает изменение во времени сопротивления разрядного промежутка, которое, в свою очередь, зависит от параметров разрядного контура.

Ключ $SW1$ используется для имитации режима перехода от сопротивления дугового разряда к сопротивлению контактов при их схождении.

```
.OPTIONS ITL4=50
.DEFINE c_br 10u
.DEFINE i_br 20m
.DEFINE PD if(abs(I(R0))<i_br OR T<c_br,0,(I(R0))*V(SM))
.DEFINE Wr SD(PD)
.MODEL S1 VSWITCH (ROFF=10MEG RON=0.001)
.IC V(SM)=0.01
```

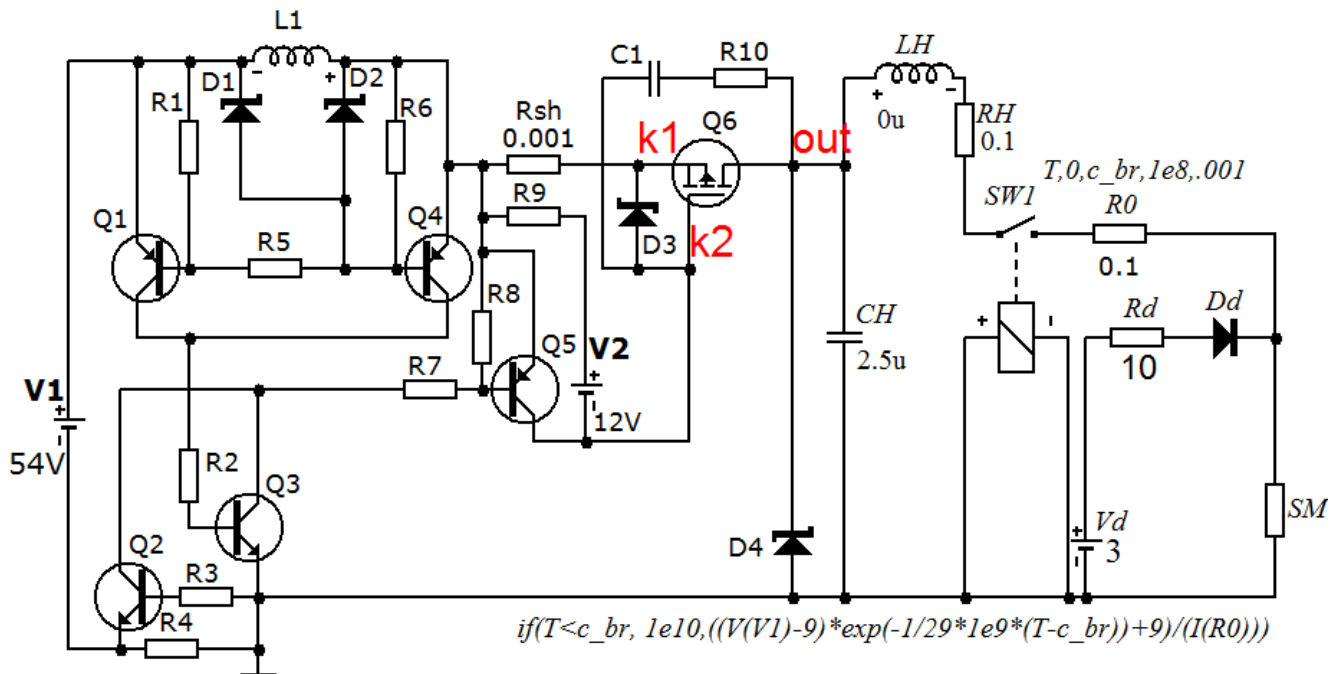


Рисунок 4.18 – Схема расчетная по емкостным разрядам замыкания барьера искрозащиты источника питания с динамической защитой для системы освещения КУОШ

Безопасная емкость CH при закорачивании ее через сопротивление $RH=0,1$ Ом при напряжении 54 В (с учетом коэффициента запаса 1,5) составляет 2 мкФ ($T_p=4,9$ мкс, $W_p=860$ мкДж) (таблица 4.8).

Для блоков питания КУОШ.200 проводились контрольные испытания в Испытательном центре ГУ «МакНИИ» (г. Макеевка). Результаты испытаний (протокол испытаний №9729-И от 12.11.2019) приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 - Результаты оценки искробезопасности источника питания КУОШ.200

Максимально допустимая внешняя индуктивность LH , мкГн		Параметры разряда		Максимально допустимая внешняя емкость CH , мкФ		Цепь
Расчет	Эксперимент	T_p , мкс	W_p , мкДж	Расчет	Эксперимент	
190	201	40,6	391	-	-	Резистивно-индуктивная
173	181	39,1	417	0,157	0,165	Индуктивно-емкостная
-	-	4,9	860	2	2,1	Емкостная

Погрешность приведенных результатов расчетной и экспериментальной оценки составляет не более 5%.

4.3. Использование результатов работы

Научные положения и результаты, изложенные в диссертационной работе, реализованы в схемотехнических решениях комплекса устройств освещения шахтного типа КУОШ (рисунок 4.19), предназначенного для освещения искробезопасными светодиодными светильниками рабочей зоны очистного забоя оснащенного механизированной крепью (протяженностью не более 300 м) и энергопоезда очистного забоя расположенного на штреке. Изготовление данного комплекса осуществляется на производственных мощностях ЧАО «НПП «Макеевский завод шахтной автоматики», г. Макеевка. Письмо о внедрении приведено в приложении Д.



Рисунок 4.19 – Внешний вид комплекса устройств освещения шахтного типа КУОШ

Составные части комплекса имеют «высокий» уровень взрывозащиты РВ (Mb), который обеспечивается:

- для источника питания видами взрывозащиты взрывонепроницаемая оболочка вида «d» (сдерживание взрыва [111]), искробезопасная электрическая цепь «i» (ограничение мощности искры согласно IEC 60079-11);
- для светильников искробезопасная электрическая цепь «i».

Безопасность применения данного уровня взрывозащиты основывается на обязательном применении автоматической газовой защиты, отключающей от сети все электрооборудование, включая осветительное, при достижении нижнего концентрационного предела метана.

Этим обоснована возможность его безопасного применения в подземных выработках угольных шахт, в том числе опасных по газу и/или пыли в соответствии с Правилами безопасности в угольных шахтах.

Основные технические характеристики комплекса приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Основные технические характеристики комплекса устройств освещения шахтного типа КУОШ

Наименование параметра и размера	Значение
Номинальное напряжение питания, переменного тока частотой 50 Гц	1140В/660В
Допустимые отклонения напряжения питающей сети от номинального, %	-15%/+10%
Уровень и вид(ы) взрывозащиты: - блок питания КУОШ.200 - светильник Ш(КУОШ.100-01) - светильник Л (КУОШ.100) - коробка клеммная КУОШ.700	РВ ЗВИб/IM2 Ex d [ia] Mb РВИб/ IM2 Ex ia Mb РВИб/ IM2 Ex ia Mb РВИб/ IM2 Ex ia Mb
Степень защиты от внешних воздействий	IP54
Количество искробезопасных выходных каналов блока питания	3
Номинальное напряжение выходного канала, постоянного тока	34 _{-0,5} В
Потребляемая мощность: - светильник Ш(КУОШ.100-01) - светильник Л (КУОШ.100)	9 Вт 6 Вт
Освещенность от светильника на расстоянии 2 м на площади с радиусом 5,5 м, не менее	5 лк
Наименование параметра и размера	Значение
Параметры искробезопасности выходного канала блока питания: - максимальное выходное напряжение U_0 ; - максимальный выходной ток I_0 ; - максимальная выходная мощность P_0 - максимальная внешняя емкость C_0 - максимальная внешняя индуктивность L_0	36 В 5 А 180 Вт 2,1 мкФ 181 мкГн
Параметры искробезопасности светильников: - максимальная внутренняя емкость C_i - максимальная внутренняя индуктивность L_i	<20 нФ <0,1 мкГн

Окончание таблицы 4.5 – Основные технические характеристики комплекса устройств освещения шахтного типа КУОШ

Наименование параметра и размера	Значение
Габаритные размеры, мм: - блок питания КУОШ.200 - светильник Ш(КУОШ.100-01) - светильник Л (КУОШ.100) - коробка клеммная КУОШ.700	680x490x650 225x135x130 250x135x116 430x370x155
Масса, кг: - блок питания КУОШ.200 - светильник Ш(КУОШ.100-01) - светильник Л (КУОШ.100) - коробка клеммная КУОШ.700	145 3,5 3,5 22

При разработке блока питания КУОШ.200 реализована приведенная в диссертационной работе базовая схема искробезопасного источника питания повышенной мощности с опережающей защитой.

Основой схемотехнических решений светильников КУОШ.100, КУОШ.100-01 послужили значения предельных параметров нагрузки (индуктивность, емкость), полученные уточненными методами расчетной компьютерной оценки искробезопасности.

Результаты оптимизации технических характеристик систем шахтного освещения с учетом их предельных параметров искробезопасности, выполненная в диссертационной работе для светильника КУОШ.100, применена при разработке технических требований к комплексу устройств освещения шахтного типа КУОШ. Это позволило уточнить расчетным методом оптимальное количество светильников, сечение кабеля, напряжение холостого хода и номинальную мощность источника, а также учесть падение напряжения в кабельной линии на каждом светильнике и т.д.

Искробезопасные параметры комплекса устройств освещения шахтного типа КУОШ с кабельной линией не менее 300 м подтверждены протоколом испытаний

№9729-И с использованием искробразующего механизма, выданным Испытательным центром «МАКНИИ» (приложение Д).

Результаты научных исследований, полученные в данной диссертационной работе при разработке метода расчетной компьютерной оценки искробезопасности разрядов замыкания и размыкания источников питания с динамической защитой, реализованы в нормативном документе «Методика расчетной оценки искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока рудничного электрооборудования» [112], утвержденном ГОУВПО «ДОННТУ» и «МАКНИИ» (приложение Д).

Разработанная методика применяется в Испытательных центрах «МАКНИИ», ГУ «НИИВЭ» (приложение Д) при:

- предварительной оценке искробезопасности электрических цепей и выборе наиболее опасных режимов для испытаний на искробезопасность с использованием искробразующего механизма;

- определении граничных электрических искробезопасных параметров оцениваемой цепи (максимальное выходное напряжение U_0 , максимальный выходной ток I_0 , максимальная внешняя емкость C_0 , максимальная внешняя индуктивность L_0);

- предварительной оценке искробезопасности особенно барьеров искрозащиты или блоков питания с нелинейной вольтамперной характеристикой (построенных на управляемых полупроводниковых компонентах), а также схемы с «опережающей защитой» (отключаемые при коммутации).

Методика также апробирована в проектно-конструкторских институтах ГУ "Автоматгомаш им. В.А. Антипова", ГУ "Донуглемаш" в процессе разработки технических средств автоматизации и управления взрывозащищенного электрооборудования, а также горных машин (приложение Д). При этом важно отметить достоинства методики, выявленные Институтами в результате опыта ее практического применения:

- позволяет производить предварительную оценку искробезопасности электрических цепей на начальной стадии проектирования схмотехнических

решений без изготовления макетов и тем более готовых изделий, что способствует экономии средств и ускорению выполнения разработки;

- обладает высокой информативностью и широкими возможностями для оценки электрических цепей, а также доступна для использования каждым сотрудником за счет ее реализации с помощью моделирования в пакете MicroCap процесса разряда;

- обеспечивает предварительную оценку искробезопасности электрических цепей без дорогостоящего специального оборудования (взрывные камеры, газо-воздушные смеси и т.д), что способствует экономии средств, выделенных на разработку;

- дает возможность производить предварительную оценку искробезопасности сложных электрических цепей, которые представляют собой совокупность последовательно - параллельных соединений, состоящих как из линейных элементов (резисторов, конденсаторов, дросселей), так и нелинейных (управляемых полупроводниковых элементов, например, транзисторов, тиристоров и т.д);

- обладает высокой информативностью при оценке электрических цепей. Результатом которой является не только качественная оценка (возможность/невозможность воспламенения потенциально взрывоопасной атмосферы от искрения), но и количественная (величина запаса до граничных значений), что дает возможность, в процессе проектирования, выбирать оптимальные, с точки зрения обеспечения взрывобезопасности, параметры разрабатываемого электрооборудования.

4.4 Выводы

1. Предложен способ определения тока обрыва дуги в виде аналитического выражения, при котором достигается максимальное расчетное значение энергии, выделенной в разряд.

2. Получена экспериментальным путем диаграмма освещенности светильника КУОШ.100, с учетом которой определено необходимое количество светильников – 68 шт, предложено устанавливать светильники на каждую третью секцию крепи типа ДМ (на расстоянии 5,9 м) в очистной выработке, длиной 300 м и мощностью вынимаемого пласта 1,5 м. При этом будет обеспечен нормируемый уровень освещенности рабочего пространства не ниже 5 лк.

2. Установлены зависимости допустимого времени срабатывания источника питания от напряжения цепи, сечения кабельной линии и мощности нагрузки, обеспечивающие искробезопасность системы освещения с кабельной линией 400 м. По результатам анализа которых обоснованы параметры безопасности источника питания с динамической защитой: быстрдействие (4 мкс), напряжение (36 В), ток уставки (5 А), количество каналов (3 шт), а также сечение кабельной линии (6 мм²).

3. Экспериментально подтверждено, что время срабатывания источника питания с динамической защитой для омических цепей в 3,6 раза меньше, чем для индуктивно-емкостных цепей кабельной линии длиной 400 м и сечением 6 мм².

4. Получены предельные искробезопасные параметры источника питания по уточненной методике бескамерной оценки искробезопасности, их сравнение с данными испытаний МакНИИ показало, что расхождение результатов расчета с экспериментальными данными не превышает 5%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую квалификационную работу, в которой на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача повышения уровня взрыво-, пожаро- и электробезопасности, а также предупреждения травматизма в очистных выработках шахт, опасных по газу и пыли на основании применения научно обоснованных аналитических зависимостей для определения минимальной воспламеняющей энергии разряда, допустимого искробезопасного тока источников питания с динамической защитой и индуктивно-резистивной нагрузкой, уточнения состояний процесса выделения энергии в разряд с учетом комплекса взаимодействующих факторов, которые позволили обосновать граничные параметры искробезопасности и разработать систему освещения очистных выработок.

Полученные в диссертации результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1. По результатам экспериментальных исследований установлено, что более опасным режимом по выделению энергии в разряд (в 1,2 раза) является сочетание приложенного напряжения к контактирующей паре: вольфрам – анод, кадмий – катод. Для указанной полярности выявлена величина напряжения на разряде – 9 В и время его установления – 29 нс, которые определяются материалом контактирующих пар и не зависят от начального напряжения цепи. Это позволило уточнить математическую модель дугового разряда в индуктивно-ёмкостных цепях, обеспечивающую погрешность результатов моделирования и экспериментальных данных не более 5%.

2. С помощью усовершенствованной математической модели дугового разряда в индуктивно-ёмкостной искробезопасной цепи определены и предложены регрессионные уравнения расчета минимальной воспламеняющей энергии $W_{в}(T_p, E)$ в диапазоне напряжений от 20 до 300 В и длительности разряда от 0,1 мкс до 14 мс, их коэффициентов, что послужило основой для развития расчётного метода оценки искробезопасности данных электрических цепей.

3. Предложен усовершенствованный метод расчётной оценки искробезопасности сложных ёмкостных, а также индуктивно-ёмкостных цепей, позволяющий производить оценку источников питания с динамической защитой с погрешностью не более 4,7 % от оценок, полученных с помощью испытательных камер.

4. Разработана и обоснована усовершенствованная математическая модель разряда размыкания индуктивно-резистивных электрических цепей, позволяющая уточнить известный расчётный метод оценки их искробезопасности. В диапазонах скоростей от 0,046 м/с до 6,5 м/с энергетические показатели, полученные при моделировании, приближены к экспериментальным с погрешностью не более 2 %.

5. Для цепей с малой длительностью разряда предложен усовершенствованный метод бескамерной оценки искробезопасности сложных индуктивно-резистивных цепей, используемый при проектировании и предварительных испытаниях, позволяющий производить оценку искробезопасных электрических цепей систем освещения с погрешностью не более 4 % от оценок, полученных с помощью испытательных камер. При этом время цикла разработки систем освещения очистных выработок, испытаний сократилось не менее, чем в 2 раза.

6. Получены регрессионные зависимости допустимого искробезопасного тока источников питания с динамической защитой и индуктивно-резистивной нагрузкой от напряжения цепи, ее индуктивности и времени срабатывания источника, что является основой предварительной оценки искробезопасности электрических цепей освещения в очистных выработках угольных шахт, опасных по газу и/или пыли.

7. Обоснованы параметры и разработана электрическая схема источника питания напряжением 36 В с повышенной искробезопасной мощностью 180 Вт, который позволил сформулировать требования в Техническое задание, создать опытный образец системы освещения очистных выработок угольных шахт КУОШ и обеспечить ее безопасные свойства с учетом распределенных параметров контрольных кабелей КГВШ сечением 6 мм².

8. По результатам работы разработана методика «Расчётная оценка искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока», которая является средством предварительной оценки искробезопасности разрабатываемых и испытываемых технических средств взрывозащищенного электрооборудования, что значительно сокращает сроки их внедрения в угольную промышленность, экономит средства, выделенные на разработку и позволяет максимально использовать допустимый искробезопасный уровень мощности цепи.

Список литературы

1. *Медведев, Г.Д.* Электрооборудование и электроснабжение горных предприятий. – М.: Недра, 1980. – 365 с.
2. *Сафин, Р.Г.* Предотвращение травмирования машиниста горных выемочных машин при его зажатии между корпусом выемочного комбайна и перекрытием секции механизированной крепи./ *Р.Г. Сафин, И.Ю. Голик* // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – Макеевка.:МакНИИ, 2017. 2(37) – С.30-35.
3. *Кашуба, О.И.* Анализ причин травматизма на шахтах Украины./*О.И. Кашуба, Н.Б. Левкин, Е.А. Спиридонов, М.С. Ковчужный*// Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – Макеевка.:МакНИИ, 2007. – С.172-177.
4. СТ СЭВ 2619–80. Освещение подземных горных выработок. Основные требования и методы измерений. – Введ. с 01.07.1983. – М., 1983. – 5 с.
5. ГОСТ Р 55733-2013. Освещение подземных горных выработок. Основные требования и методы измерений. – Введ. с 01.09.2014. – М.: Стандартиформ, 2014. – 16 с.
6. СОУ 10.1-00185790-002-2005. Правила технічної експлуатації вугільних шахт. – Введ. с 14.11.2006. – К.: Минуглепром Украины, 2006. – 354 с.
7. НПАОП 10.0-3.01-90. Нормативы по безопасности забойных машин, комплексов и агрегатов. – Введ. с 26.06.1990. – Макеевка, 1990. –103 с.
8. ГОСТ 31438.2-2011 (EN 1127-2:2002). Взрывоопасные среды. Взрывозащита и предотвращение взрыва. Часть2. Основополагающая концепция и методология (для подземных выработок) – Введ. с 15.02.2013. – М.: ФГУП «Стандартиформ», 2013. – 26 с.
9. НПАОТ 10.0-1.01–16. Правила безопасности в угольных шахтах. – Введ. с 22.07.2016. – Макеевка: ЧП «Полипресс», 2016. – 230 с.

10. ТР ТС 012/2011. Регламент таможенного союза «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах». – Введ. с 18.10.2011. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2015. – 55 с.
11. ГОСТ 31610.0-2014 (IEC 60079-0:2011). Взрывоопасные среды. Часть 0. Оборудование. Общие требования. – Введ. с 01.12.2016. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2015. – 81 с.
12. DIRECTIVE 2014/34/EU. On the harmonisation of the laws of the Member States relating to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres (recast). – 2014. - 48 с.
13. *Жданкин В. К.* Взрывоопасные зоны, сравнение видов взрывозащиты.// Современные технологии автоматизации . – М., 2000. – № 1.- С. 66-73.
14. ГОСТ 31610.11-2014 (IEC 60079-11:2011). Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i». – Введ. с 01.12.2015. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2016. – 120 с.
15. *Жданкин, В.К.* Вид взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь». // Современные технологии автоматизации. – М., 1999. – № 2. – С. 72-83.
16. *Мезников, А.В.* Светильники забойные типа СЗ для очистных и проходческих забоев./А.В. Мезников, Р.А. Кудлай// Уголь Украины . – Киев., 2013. – № 10.- С. 33-40.
17. *Долженков, А.Ф.* Анализ основных направлений создания безопасных условий труда подземных рабочих угольных шахт./А.Ф. Долженков, Т.А. Нигрей// Вести Донецкого горного института. – Красноармейск.:ДонНТУ, 2015. – №1(36)-2(37). – С.123-129.
18. *Мышковский, М.* Разработка длинными очистными забоями угольных пластов средней мощности. – Caterpillar Inc, 2015. – 52 с.
19. *Айзенберг, Ю.Б.* Справочная книга по светотехнике. – М.: Энергоиздат. 1995. – 950 с.

20. *Кормильцев, П.В.* Система искробезопасного шахтного освещения./П.В. Кормильцев, И.А. Бершадский// Наукові праці ДонНТУ: серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонНТУ, 2014. – Випуск 1(16). – С. 90-94.
21. *Иохельсон, З. М.* Предотвращение пожаров в шахтах от электрических искр рудничного электрооборудования / З. М. Иохельсон, О. И. Кашуба, И. А. Бершадский // Науковий вісник УкрНДПБ . - Випуск № 2(16): Київ , 2007. - С . 23-27.
22. ГОСТ 30852.4-2002 (МЭК 60079-3:1990). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 3. Искрообразующие механизмы для испытаний электрических цепей на искробезопасность. – Введ. с 15.02.2014. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. – 26 с.
23. ГОСТ 22782.5-78. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытаний. – [Введ. с 01.01.80]. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – С. 24-28.
24. IEC 60079-11:2011. Explosive atmospheres - Part 11: Equipment protection by intrinsic safety "i". – 2011. - 120 с.
25. *Диденко, В. П.* Способы оценки и обеспечения искробезопасности на основе моделирования движения контактов искрообразующего механизма и переходных процессов в электрических цепях: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Макеевка - Донбасс.: МакНИИ , 1990. – 18 с.
26. ГОСТ Р 51330.10–99. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i». – Введ. с 01.01.2001. – М.: Госстандарт России , 2000 . – 118 с.
27. *Ерыгин, А.Т.* Развитие расчетного метода оценки искробезопасности электрических цепей. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М, 2010. – С. 435 - 447.

28. *Жданкин, В.К.* Оценка искробезопасности электрических цепей.// Современные технологии автоматизации , 2000. - № 3. – С . 72-80.
29. *Трембицкий, А. Л.* Разработка и совершенствование методов оценки искробезопасности электрического искрения на горных предприятиях со взрывоопасной атмосферой : дис . на соиск . учен . с тепени докт . техн . наук : спец . 05.26.01 – М .:2002. – 361 с . – ИПКОН РАН.
30. *Ерыгин, А.Т.* Методы оценки искробезопасности электрических цепей./А.Т. Ерыгин, Л.А.Трембицкий, В.П. Яковлев// – М .: Наука , 1984. - 256 с.
31. *Петренко, Б. А.* Расчет и испытание индуктивно-емкостных искробезопасных цепей. – Электротехническая промышленность, 1962, №6, с. 15-17.
32. *Залогин, А. С.* Рекомендации по оценке искробезопасности сложных индуктивно - емкостных, а также индуктивных цепей с различными шунтами.// Ежеквартальный специализированный журнал по оборудованию для взрывоопасных сред ExInfo – 2007 . № 4 , с . 2-6.
33. *Иохельсон, З. М.* Определение искробезопасных параметров безреактивных электрических цепей рудничного оборудования / З. М. Иохельсон, А. Ю. Гладков, В. Л. Задорожная // Уголь Украины., Киев, – 2007. – № 3. – С. 38-40.
34. *Ерыгин, А.Т.* Разработка расчетного метода оценки искробезопасности барьеров безопасности на стабилизаторах./А.Т. Ерыгин, А.Н. Шатило, М.С. Спасов// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М , 2014. – С. 349 - 353.
35. *Петренко, Б. А.* Метод расчета искробезопасных электрических цепей по величинам энергии и мощности / Б . А . Петренко // В кн .: Науч . сообщ . ИГД им.А . А . Скочинского . М .: Недра , 1967. - № 33. С . 94-103.
36. *Толченкин, Р. Ю.* Новый способ оценки искробезопасности химических источников тока // Уголь. – 2008. - № 9. – С. 56-57.

37. *Толченкин, Р. Ю.* Разработка метода оценки и способов обеспечения искробезопасности рудничных переносных приборов и электрооборудования: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – М., 2009. – 18 с. – УРАН ИПКОН РАН.
38. *Диденко, В.П.* Расчетное определение граничных воспламеняющих токов индуктивных цепей // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк: ДонНТУ, 2009, № 1. – С. 233-240.
39. *Диденко, В.П.* Расчетная оценка искробезопасности емкостных цепей // Сб. научных трудов УкрНИИВЭ «Взрывозащищенное электрооборудование». – Донецк: УкрНИИВЭ, 2009. – С. 258-266.
40. *Диденко, В.П.* Зависимости минимальной воспламеняющей энергии от длительности разряда и скорости коммутации. // Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок / Зб . наук . праць .- Вип. 102-103.- Донецьк : ВАТ « НДІГМ ім. М. М. Федорова», 2008-2009. – С. 395-404.
41. *Бершадский, И. А.* Расчет параметров разряда для оценки искробезопасности емкостных цепей. // Уголь Украины.– Киев, 2010, № 12. – С.31-36.
42. *Ковалев, А.П.* Моделирование параметров разряда и расчетная оценка искробезопасности при размыкании электрической цепи./А.П. Ковалев, И.А. Бершадский, З.М. Йохельсон// Журнал «Электричество».– Москва, 2009, №11.– С. 62-69.
43. *Гладков, А.Ю.* Использование методов расчетной оценки искробезопасности для источников с опережающим отключением./ А.Ю. Гладков, И.А. Бершадский, В.В. Якимишина// Безопасность труда в промышленности. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. – Выпуск 2. – С. 13-19.
44. *Бершадский, И.А.* Развитие научных основ и методов создания искробезопасного электрооборудования для повышения безопасности труда горнорабочих: дис. на соиск. учен. степени докт. техн. наук: спец. 05.26.01 - Донецк.: 2014. – 356 с. – МОН Украины, ГВУЗ ДНТУ.

45. *Гладков, А.Ю.* Совершенствование математической модели разряда емкостной искробезопасной цепи./ А.Ю. Гладков, И.А. Бершадский, С.В.Шлепнев // Вестник ДонНТУ. – Донецк.: ДонНТУ, 2019. № 1(15). – С. 51-58.
46. *Бершадский, И.А.* Тестирование метода бескамерной тепловой оценки искробезопасности схемы источника питания./ И.А. Бершадский, Ал.А.Дубинский // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. научных трудов УкрНИИВЭ. – Донецк, 2011. – С. 230 - 240.
47. *Кравченко, В.С.* Искробезопасность электрических цепей./ В.С. Кравченко, В.И. Серов, А.Т. Ерыгин, А.Е. Погорельский// – М.: Наука, 1976. – С. 190-192.
48. *Кириченко, Б. М.* Параметрические искробезопасные источники питания /Б. М. Кириченко, Я.Л. Красик, Л.И. Раппопорт // В кн.: Научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы по автоматике угольных шахт. – М.: Недра, 1966. – Вып. №1. – С. 37-42.
49. Пат. 68987 А Україна, МКИ Е 21 F 9/00. Блок для іскрозахисту кіл дистанційного керування / Діденко В. П., Гладков О. Ю., Шапран Ю. Г., Громовий М. А., Горохов О. В.; заявник та патентовласник МакНДІ. - № 20031110610; заявл. 25.11.2003 ; опубл. в Бюл., 2004, № 8.
50. Пат. 61807 Україна, МПК F21L 2/00. Блок іскрозахисту / Брюханов О. М., Коптиков В. П., Гладков О. Ю., Муфель Л. А., Гречка А. В; заявник та патентовласник МакНДІ. - № U2011 01409; заявл. 08.02.2011 ; опубл. в Бюл., 2011, № 14.
51. Пат. 61198 Україна, МПК Н01Н 33/66. Магнітний пускач / Брюханов О. М., Коптиков В. П., Муфель Л. А., Гладков О. Ю., Демченко О. О., Кац О. Б., Дубінський А. О., Марейченко І. В.; заявник та патентовласник МакНДІ. - № U2010 15765; заявл. 27.12.2010 ; опубл. в Бюл., 2011, № 13.

52. *Гладков, А.Ю.* Особенности искробезопасных источников питания./А.Ю. Гладков, И.А. Бершадский// Завалишинские чтения / Сб. докладов 11-15 апреля 2016 ГУАП. – Санкт Петербург, 2016. – С. 30-33.
53. *Красик, Я. Л.* Увеличение мощности искробезопасных систем путем сокращения длительности коммутационных разрядов: Автореф. дис. на соиск. учен.степени канд. техн. наук. – М., 1970. – 15 с. – ИГД им. А. А. Скочинского.
54. *Кириченко Б. М.* Способы и средства обеспечения искробезопасности электрических цепей./Б.М. Кириченко, Э.Г. Коган//. – М.: ЦНИЭИуголь, 1976. С. 34-38.
55. *Давыдов, В.В.* Динамическая искрозащита взрывозащищенного электрооборудования. // Безопасность труда в промышленности. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – Выпуск 7. – С. 23-27.
56. *Кравченко, В.С.* Исходные данные для создания искробезопасных источников питания повышенной мощности. / В.С. Кравченко, А.Т. Ерыгин, В.П. Яковлев, В.В. Давыдов // Сб. науч. тр. СФТП ИФЗ АН СССР. –М, 1973. - Вып. 4. – С. 159-163.
57. *Красик, Я. Л.* Искробезопасные источники питания повышенной мощности для автоматизации угледобывающих комплексов и агрегатов// В кн.: Материалы 3- го Всесоюзного совещания по взрывозащищенному электрооборудованию. – Донецк, 1967. – С. 37-38.
58. А.с. 608963 СССР. Устройство контроля начала аварийного разряда в искробезопасных цепях/ А.Т. Ерыгин, В.П. Яковлев, В.В. Давыдов, А.Л. Трембицкий. — Бюл. № 20//Открытия. Изобретения. — 1978. — № 20.
59. *Давыдов, В.В.* Основные направления повышения эффективности полупроводниковой искрозащиты./ В.В. Давыдов, В.М. Листвинский, А.А. Сорокин //Сб. докл. конф. ICAMC: Докл. 3.2. — Острава, 1990.

60. *Гаврильченко, Л. И.* Опережающее отключение и искробезопасность в шахтных системах электрического взрывания : автореф. дис. на соиск. учен. Степени канд. техн. наук. – М., 1962. – 16 с. – Моск. горн. ин-т. 3
61. *Ерыгин, А. Т.* Теоретические основы и обеспечение искробезопасности рудничного электрооборудования: Дис. на соиск. учен. степени докт. техн. наук. – М.: 1987. – 495 с. – ИПКОН АН СССР.
62. *Погорельский, А. Е.* Увеличение искробезопасной мощности безреактивных цепей сокращением длительности разряда / А.Е. Погорельский, Б.М. Кириченко, Н. А. Марсюк//. – Горные машины и автоматика. – 1976. – №3. – С. 27-29.
63. *Марсюк, Н. А.* Исследование и разработка шахтных искробезопасных источников питания с устройствами сокращения длительности коммутационных процессов: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1978. – 25 с. – Днепропетровский горн. ин-т.
64. *Коган, Э. Г.* Влияние кабеля на искробезопасность цепей с управляемыми устройствами искрозащиты / Э. Г. Коган, В. Ф. Лахманов, В. П. Диденко // Безопасность труда в промышленности. – М. – 1986. – С. 45-46.
65. *Макаров, Г.И.* Исследование и разработка средств обеспечения искробезопасности в шахтных слаботочных цепях с распределенной емкостью : автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. - Кемерово, 1982. - 24 с. –ВостНИИ.
66. *Ерыгин, А. Т.* Влияние электрических параметров линии связи на искробезопасность систем передачи информации./А.Т. Ерыгин, Б.В. Чернов // Угольное машиностроение / ЦНИИЭИуголь. – М., 1980. - № 11. – с. 7-11.
67. *Коган, Э. Г.* Вопросы оценки и обеспечения искробезопасности аппаратуры автоматизации горных машин: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – М., 1972. – 16 с. – Моск. горн. ин-т.

68. *Коган, Э. Г.* Влияние кабельных линий связи на искробезопасность аппаратуры шахтной автоматики / Э.Г. Коган, В.Ф. Лахманов, С.В. Мамченко, В.П. Диденко // Автоматика для забойных машин / НПО Автоматгормаш. – М., 1984. – с.79-85.
69. *Ерыгин, А. Т.* Обеспечение искробезопасности линии связи в шахтных переносных приборах / А.Т. Ерыгин, Р.Ю. Толченкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2007. – № 12. – С. 342-346.
70. *Коган, Э. Г.* Обеспечение искробезопасности систем автоматики с кабельными линиями связи / Э. Г. Коган, С. В. Мамченко, В. П. Диденко // Уголь Украины.– 1988. – № 7. – С. 32-33.
71. *Семенов, В. А.* О влиянии кабеля на искробезопасность электрических систем / В.А. Семенов, Н.А. Черников // В кн.: Взрывобезопасное электрооборудование. – М., Недра, 1984. – Вып. II. – С. 8-12.
72. *Залогин А.С.* Оценка искробезопасности систем с кабельными линиями. /А.С. Залогин, Э.Г. Коган, О.Б. Малкович// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М , 2006. – С. 266 - 282.
73. *Петренко, Б.А.* Электрический разряд в искробезопасных цепях.// Механизация и автоматизация в горной промышленности. - М.: Госгортехиздат, 1963. - Вып. 3. - С. 300 – 317.
74. *Демихов, В.И.* Искробезопасность емкостных электрических цепей / В.И.Демихов, В.Г. Луппа // Безопасность труда в промышленности.- М.: – 1971. – № 3. – С.51-52.
75. *Бершадский, И.А.* Предельные условия воспламенения рудничного газа в искробезопасных емкостных электрических цепях /И.А Бершадский, Д.В Северин// Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецк.: 2009, № 9(158). – С. 15 - 20.

76. *Петренко, Б.А.* Влияние емкости (конденсатора , кабеля) на воспламеняющую способность электрических разрядов// В кн .: Взрывобезопасное электрооборудование . - М ., Центр . бюро техн . информ . НИИ электропромышленности . - 1959. - С . 270-290.
77. *Залогин, А.С.* Исследование электрических разрядов замыкания емкостных цепей. /А.С. Залогин, Э.Г. Коган, О.Б. Малкович // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М , 2006. – С. 103 - 107.
78. *Очков, В.Ф.* Mathcad14 для студентов, инженеров и конструкторов. Спб. БХВ-Петербург, 2007. 368 с.
79. *Диденко, В.П.* Современные подходы к оценке и обеспечению искробезопасности электрических цепей / В.П. Диденко // Уголь Украины. К.:– 2007. – №9. – с. 39-42.
80. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. [Действующий с 2013-01-01]. Москва: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2013. 19 с.
81. *Гладков, А.Ю.* Экспериментальные исследования разряда короткого замыкания емкостной искробезопасной цепи. /А.Ю. Гладков, И.А. Бершадский, А.П. Ковалев // Сб. научных трудов НИИВЭ «Взрывозащищенное электрооборудование». – Донецк: НИИВЭ, 2017. – С. 154-164.
82. *Коган, Э.Г.* Способы и средства обеспечения искробезопасности рудничного электрооборудования. Москва: Недра, 1988. 101 с.
83. *Амелина, М.А.* Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap версии 9, 10. Смоленск: НИУ МЭИ , 2012. 617 с.
84. Micro-Cap 9. Electronic Circuit Analysis Program. User's Guide. Copyright 1982-2007 by Spectrum Software 1021 South Wolfe Road Sunnyvale, CA 94086. Internet: www.spectrum-soft.com.

85. *Бершадский, И.А.* Разработка методики сертификации и конструирования блоков искрозащиты рудничного электрооборудования. / И.А. Бершадский, А.Ю. Гладков, Л.С. Соломатина// Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецк.: 2013, № 1(14). – С. 23 - 28.
86. *Крижанский, С. М.* К теории вольтамперной характеристики столба нестационарного дугового разряда высокого давления / С.М. Крижанский // Журнал технической физики. - 1965. - Вып. 10., т. 35.
87. *Залесский, А. М.* Основы теории электрических аппаратов / А. М. Залесский . – М.: Высш. школа , 1974. – 184 с.
88. *Петренко, Б.А.* Воспламеняемость газов и физические основы электровзрывобезопасности / Б . А . Петренко . – М .: Наука , 1989. – 150 с.
89. *Петренко, Б.А.* Научные основы электровзрывобезопасности в горнодобывающей и нефтехимической промышленности (теоретические вопросы)/ Б .А . Петренко . - М .: Наука , 1980. - 123 с.
90. *Таев, И. С.* Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения / И .С. Таев . – М .: Энергия , 1965. – 224 с.
91. *Таев, И. С.* Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения / И . С . Таев . – М .: Энергия , 1973. – 424 с.
92. ГОСТ Р МЭК 60079-25-2012 (IEC 60079-25:2010). Взрывоопасные среды. Часть 25. Искробезопасные системы. – Введ. с 01.07.2013. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. – 66 с.
93. *Оглоблин, А.В.* Искробезопасное шахтное освещение //А.В. Оглоблин, В.В. Давыдов // Горные науки и технологии -М., 2011. – Выпуск 11. – С. 41-47.
94. *Бершадский, И.А.* Повышение технических характеристик искробезопасного светодиодного освещения. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 22 – 32.

95. *Гладков, А.Ю.* Метод расчета параметров систем освещения для оценки их искробезопасности / А.Ю. Гладков, О.Г. Болтунов, С.Л. Тарасенко // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сборник научных трудов – Макеевка: Издание МакНИИ, 2015. №1(35) 46-55 с.
96. *Гладков, А.Ю.* Оптимизация технических характеристик шахтного освещения с учетом предельных параметров искробезопасности/ А.Ю. Гладков, И.А. Бершадский // Безопасность труда в промышленности / Научно-производственный журнал. – №7 2016. – С. 41-47.
97. *Абраменко, І.Г.* Проблеми вибухобезпечності електричних кіл освітлювальних установок // І.Г. Абраменко, В.Ф. Рой, Н.Г. Бурма // Світлотехніка та електроенергетика. – 2011. – №1. – С. 60-64.
98. Кабели шахтные фирмы TELE-FONIKA Kable. Основные технические характеристики. <http://tf-k.com/downloads/shcable.pdf>
99. Каталог кабельной продукции ЧАО «ПО Бердянський кабельний завод». Основные технические характеристики. <http://www.bkz.com.ua/docs/bkz-catalog.pdf>
100. *Давыдов, В.В.* Воспламеняющая способность электрических разрядов сокращенной длительности при коммутации индуктивных цепей// Сб. науч. тр./ СФТГП ИФЗ АН СССР.- 1974.-С. 191-200.
101. *Ерыгин, А.Т.* Эффективность тиристорной защиты при обеспечении искробезопасности индуктивных цепей./А.Т. Ерыгин, В.В. Давыдов // Сб. науч. тр./ СФТГП ИФЗ АН СССР, вып.6.- 1975.-С. 204-214.
102. *Ерыгин, А.Т.* Исследования воспламеняющей способности разрядов размыкания в электрических цепях с кабельной линией связи./А.Т. Ерыгин, Б.В. Чернов // Сб. науч. тр. Основные вопросы комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых. – М., ИПКОН АН СССР, 1981. – С.171-190.

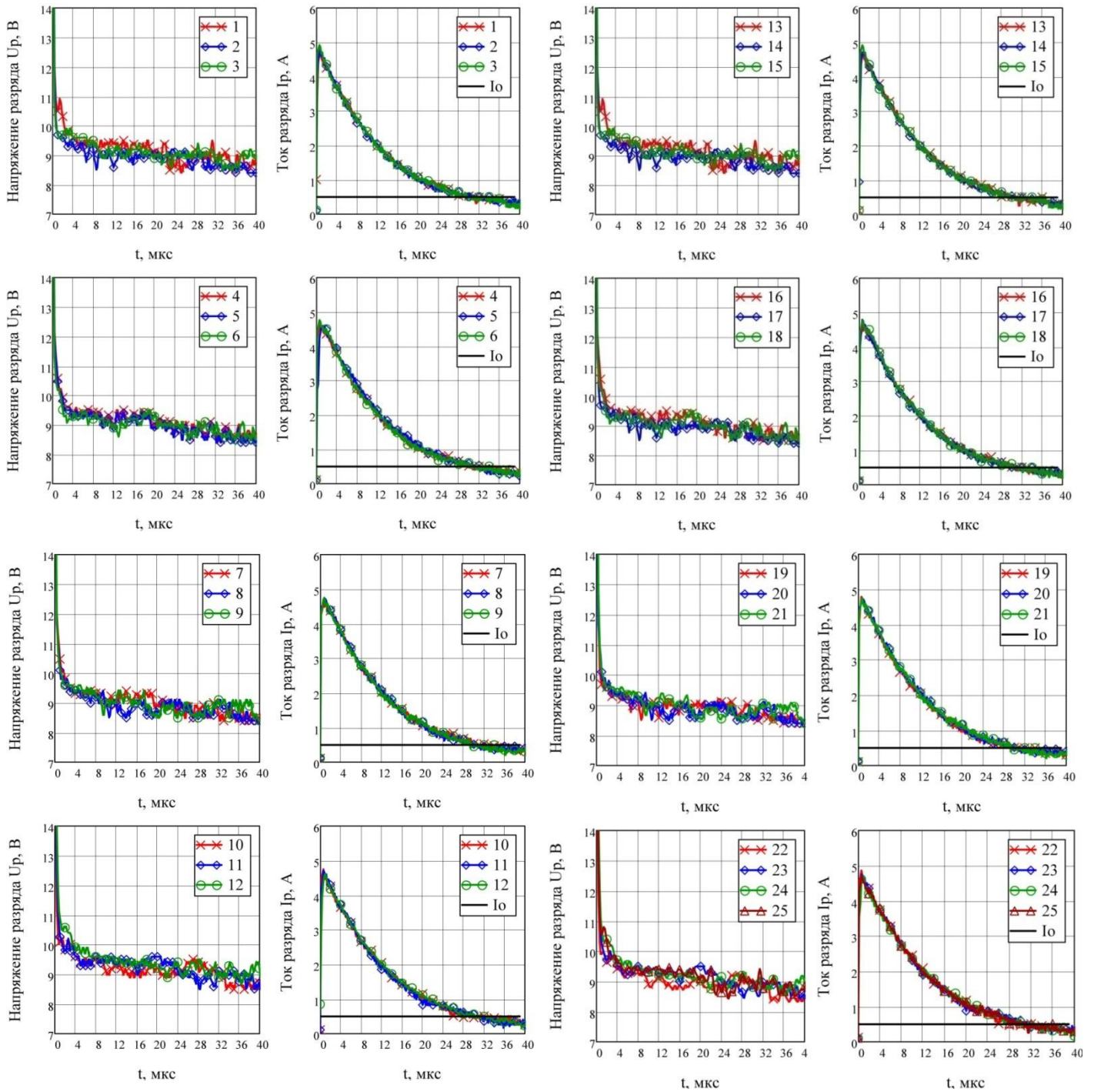
103. *Колосяк, В.П.* Защитное отключение рудничных электроустановок. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
104. *Озерной, М.И.* Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт. – М.: Недра, 1975. – 445 с.
105. А. с. 1227819 СССР, МКИ Е 21 F 9/00, G 05 F 1/58. Искробезопасный источник питания / Кириченко Б. М., Губкин А. В., Ефремов А. П. (СССР). – №3728152/24-07 ; заявл. 21.04.84 ; опубл. в Б. И. – 1986. – № 16.
106. А.с. 956815 СССР, МКИ Е 21 F 9/00, Н 02 Н 7/26. Искробезопасный источник питания / Гуммель Я.Я., Тетерников А.В. (СССР). –№3230595/24-07; заявл. 4.01.81 ; опубл. в Б. И. – 1982. – № 33.
107. А. с. 1518545 СССР, МКИ Е 21 F 9/00. Искробезопасный источник питания / Кириченко Б. М., Диденко В. П., Ефремов А. П. (СССР). – № 4357272/23-03; заявл. 04.11.88 ; опубл. в Б. И. – 1989. – № 40.
108. А. с. 1567798 СССР, МКИ Е 21 F 9/00. Искробезопасный источник питания / Ефремов А. П., Кириченко Б. М., Бахмут А. В., Диденко В. П. (СССР). – №4483602/24-03 ; заявл. 04.07.88 ; опубл. в Б. И. – 1990. – № 20.
109. ГОСТ 31610.39-2017. Взрывоопасные среды. Часть 39. Искробезопасные системы с электронным ограничением длительности искрового разряда. – Введ. с 01.06.2019. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2018. – 40 с.
110. *Диденко, В.П.* Исследование скорости изменения напряжения на разрядах для совершенствования искробезопасных источников питания // Уголь Украины. – 2009. - № 1-2. – С. 35-37.
111. ГОСТ ИЕС 60079-1:2013. Взрывоопасные среды. Часть 1. Оборудование с видом взрывозащиты «Взрывонепроницаемые оболочки «d». – Введ. с 01.07.2015. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. – 66 с.

112. Методика расчетной оценки искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока рудничного электрооборудования. — Донецк : ГОУВПО «ДонНТУ» и ГУ «МакНИИ», 2019. — 38 с.

Приложение А

Разряды замыкания аperiodической RC цепи

А.1. Осциллограммы разрядов при напряжении 30 В и полярности вольфрам – катод



Теоретическое значение Gt при уровне значимости 5% Gt=2.822

Проверка принадлежности выборки к нормальному закону

$$d_DL := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|DL_i - \text{mean}(DL)|)}{25 \cdot \text{stdev}(DL)}$$

$$d_DL = 0.825$$

$$d_Imax := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Imax_i - \text{mean}(Imax)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Imax)}$$

$$d_Imax = 0.769$$

$$d_Wr := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Wr_i - \text{mean}(Wr)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Wr)}$$

$$d_Wr = 0.851$$

Квантили распределения

d(1-q)=0,7360 d(q)=0,8686 Верхний квантиль ф-ции Лапласа принят 2,17
 2.17-SKO DL = 1.101 2.17-SKO_Wr = 27.369 2.17-SKO Imax = 0.19

Разность массива

Сортировка по возрастанию массива разностей

i := 1..25
 K_DL_i := |DL_i - mean(DL)|
 K_Wr_i := |Wr_i - mean(Wr)|
 K_Imax_i := |Imax_i - mean(Imax)|

1	
1	0.152
2	0.152
3	0.152
4	...

sort(K_DL) =

1	
1	9.563·10 ⁻³
2	0.017
3	0.017
4	...

sort(K_Wr) =

1	
1	1.697
2	2.321
3	2.796
4	...

Доверительные границы случайной погрешности. Коэф. Стьюдента 2,064 при доверительной вероятности 0,95

$$\xi_DL := 2.064 \cdot \frac{SKO_DL}{\sqrt{25}} \quad \xi_Wr := 2.064 \cdot \frac{SKO_Wr}{\sqrt{25}} \quad \xi_Imax := 2.064 \cdot \frac{SKO_Imax}{\sqrt{25}}$$

$$\xi_DL = 0.21 \quad \xi_Wr = 5.206 \quad \xi_Imax = 0.036$$

DL max := mean(DL) + ξ_DL Wr max := mean(Wr) + ξ_Wr Imax max := mean(Imax) + ξ_Imax
 DL max = 30.962 Wr max = 564.481 Imax max = 4.768
 DL min := mean(DL) - ξ_DL Wr min := mean(Wr) - ξ_Wr Imax min := mean(Imax) - ξ_Imax
 DL min = 30.542 Wr min = 554.068 Imax min = 4.695

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

Коэффициент

$$K_DL := \frac{\xi_DL + 0.1 \cdot 10}{\frac{SKO_DL}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}}$$

$$K_Wr := \frac{\xi_Wr + 0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\frac{SKO_Wr}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}}$$

$$K_Imax := \frac{\xi_Imax + 0.05 \cdot 5}{\frac{SKO_Imax}{\sqrt{25}} + \frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}}$$

$$K_DL = 1.782 \quad K_Wr = 1.756 \quad K_Imax = 1.768$$

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

$$\Delta_DL := K_DL \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_DL}{\sqrt{25}}\right)^2}$$

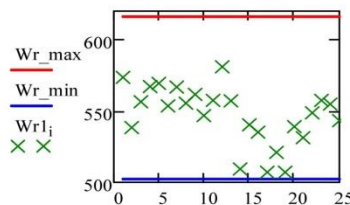
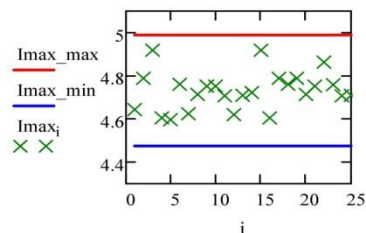
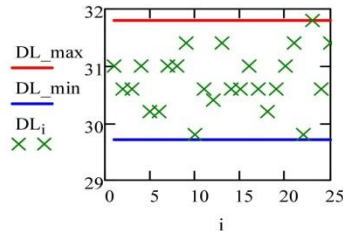
$$\Delta_Wr := K_Wr \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_Wr}{\sqrt{25}}\right)^2}$$

$$\Delta_Imax := K_Imax \cdot \sqrt{\left(\frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_Imax}{\sqrt{25}}\right)^2}$$

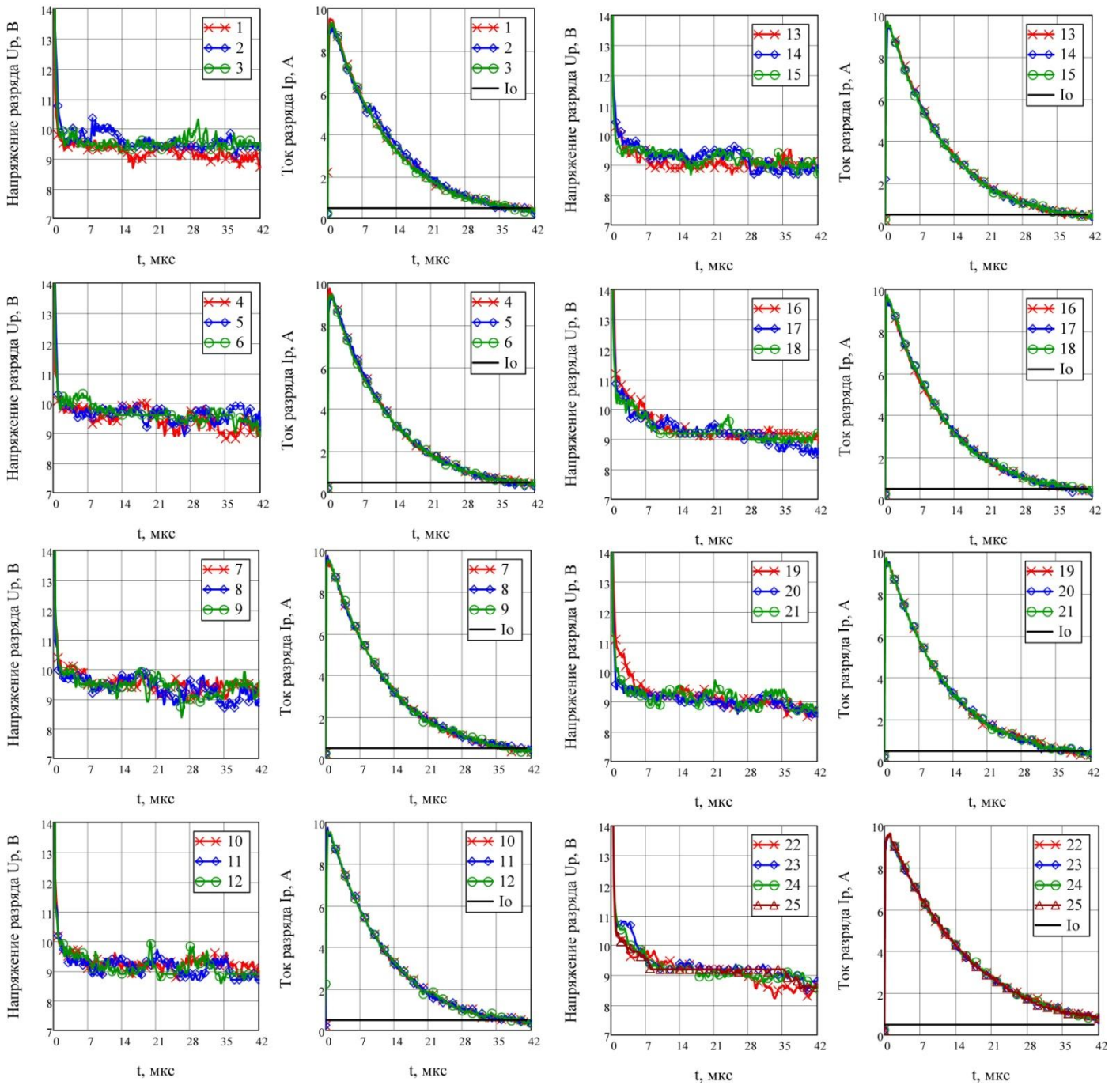
$$\Delta_DL = 1.044 \quad \Delta_Wr = 56.877 \quad \Delta_Imax = 0.257$$

$$\xi_DL = 0.21 \quad \xi_Wr = 5.206 \quad \xi_Imax = 0.036$$

DL_max := mean(DL) + Δ_DL Wr_max := mean(Wr) + Δ_Wr Imax_max := mean(Imax) + Δ_Imax
 DL_min := mean(DL) - Δ_DL Wr_min := mean(Wr) - Δ_Wr Imax_min := mean(Imax) - Δ_Imax
 DL_max = 31.796 Wr_max = 616.151 Imax_max = 4.988
 DL_min = 29.708 Wr_min = 502.398 Imax_min = 4.474



А.3. Осциллограммы разрядов при напряжении 50 В и полярности вольфрам - катод



А.4. Листинг программы обработки результатов измерений (50В)

Массив средних значений длительности DL, энергии Wr разряда и максимального тока Imax

	1
1	36.2
2	36.6
3	36.1
4	37.7
5	37
6	38
7	36
8	37.8
9	36.2
10	38
11	36
12	37.5
13	36.2
14	37
15	36.7
16	37.4
17	37.2
18	36.7
19	37
20	37.4
21	37.3
22	37.2
23	36.4
24	37.7
25	37.8

	1
1	1050.8
2	1205.2
3	1040.2
4	1172.1
5	1178.6
6	1178.8
7	1165.3
8	1160.3
9	1159.8
10	1143.4
11	1139.9
12	1149.5
13	1066.6
14	1048.8
15	1079.4
16	1179.8
17	1162.8
18	1137.8
19	1155.4
20	1182.2
21	1157.6
22	1211.4
23	1247.4
24	1227.2
25	1151.4

	1
1	9.5
2	9.3
3	9.3
4	9.6
5	9.4
6	9.4
7	9.7
8	9.7
9	9.5
10	9.5
11	9.7
12	9.6
13	9.7
14	9.4
15	9.7
16	9.4
17	9.5
18	9.6
19	9.5
20	9.6
21	9.4
22	9.6
23	9.6
24	9.5
25	9.4

Среднее арифметическое значение

$$\begin{aligned} \text{mean(DL)} &= 37 \\ \text{mean(Wr)} &= 1.15 \times 10^3 \\ \text{mean(Imax)} &= 9.5 \end{aligned}$$

Смещенное среднее квадратическое отклонение

$$\begin{aligned} \text{stdev(DL)} &= 0.646 \\ \text{stdev(Wr)} &= 53.439 \\ \text{stdev(Imax)} &= 0.128 \end{aligned}$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\text{SKO_DL} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{DL}_i - \text{mean(DL)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_DL} = 0.659$$

$$\text{SKO_Wr} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{Wr}_i - \text{mean(Wr)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_Wr} = 54.541$$

$$\text{SKO_Imax} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{Imax}_i - \text{mean(Imax)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_Imax} = 0.13$$

Исключение грубых погрешностей по критерию Граббса

$$\text{G1_DL} := \frac{|\max(\text{sort(DL)}) - \text{mean(DL)}|}{\text{SKO_DL}} \quad \text{G1_Wr} := \frac{|\max(\text{sort(Wr)}) - \text{mean(Wr)}|}{\text{SKO_Wr}}$$

$$\text{G2_DL} := \frac{|\min(\text{sort(DL)}) - \text{mean(DL)}|}{\text{SKO_DL}} \quad \text{G2_Wr} := \frac{|\min(\text{sort(Wr)}) - \text{mean(Wr)}|}{\text{SKO_Wr}}$$

$$\text{G1_DL} = 1.511$$

$$\text{G2_DL} = 1.523$$

$$\text{G1_Wr} = 1.784$$

$$\text{G2_Wr} = 2.015$$

$$\text{G1_Imax} := \frac{|\max(\text{sort(Imax)}) - \text{mean(Imax)}|}{\text{SKO_Imax}}$$

$$\text{G2_Imax} := \frac{|\min(\text{sort(Imax)}) - \text{mean(Imax)}|}{\text{SKO_Imax}}$$

$$\text{G1_Imax} = 1.431$$

$$\text{G2_Imax} = 1.758$$

Теоретическое значение Gt при уровне значимости 5% Gt=2.822

Проверка принадлежности выборки к нормальному закону

$$d_{DL} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|DL_i - \text{mean}(DL)|)}{25 \cdot \text{stdev}(DL)} \quad d_{DL} = 0.861$$

$$d_{Wr} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Wr_i - \text{mean}(Wr)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Wr)} \quad d_{Wr} = 0.74$$

$$d_{Imax} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Imax_i - \text{mean}(Imax)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Imax)} \quad d_{Imax} = 0.847$$

Квантили распределения

d(1-q)=0,7360 d(q)=0,8686 Верхний квантиль ф-ции Лапласа принят 2,17

2.17·SKO_DL = 1.431 2.17·SKO_Wr = 118.354 2.17·SKO_Imax = 0.283

Разность массива

i := 1..25

$$K_{DL_i} := |DL_i - \text{mean}(DL)|$$

$$K_{Wr_i} := |Wr_i - \text{mean}(Wr)|$$

$$K_{Imax_i} := |Imax_i - \text{mean}(Imax)|$$

Доверительные границы случайной погрешности. Коэф. Стьюдента 2,064 при доверительной вероятности 0,95

$$\xi_{DL} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}} \quad \xi_{DL} = 0.272$$

$$\xi_{Wr} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}} \quad \xi_{Wr} = 22.515$$

$$\xi_{Imax} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}} \quad \xi_{Imax} = 0.054$$

DL_max := mean(DL) + ξ_DL Wr_max := mean(Wr) + ξ_Wr Imax_max := mean(Imax) + ξ_Imax

DL_max = 37.276 Wr_max = 1.173 × 10³ Imax_max = 9.603

DL_min := mean(DL) - ξ_DL Wr_min := mean(Wr) - ξ_Wr Imax_min := mean(Imax) - ξ_Imax

DL_min = 36.732 Wr_min = 1.128 × 10³ Imax_min = 9.496

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

Коэффициент

$$K_{DL} := \frac{\xi_{DL} + 0.1 \cdot 10}{\frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}} \quad K_{Wr} := \frac{\xi_{Wr} + 0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}} \quad K_{Imax} := \frac{\xi_{Imax} + 0.05 \cdot 5}{\frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}} + \frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}}$$

K_DL = 1.794 K_Wr = 1.779 K_Imax = 1.783

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

$$\Delta_{DL} := K_{DL} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_{Wr} := K_{Wr} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}}\right)^2}$$

Δ_DL = 1.062 Δ_Wr = 119.7

ξ_DL = 0.272 ξ_Wr = 22.515

DL_max := mean(DL) + Δ_DL Wr_max := mean(Wr) + Δ_Wr

DL_min := mean(DL) - Δ_DL Wr_min := mean(Wr) - Δ_Wr

DL_max = 38.066 Wr_max = 1.27 × 10³

DL_min = 35.942 Wr_min = 1.03 × 10³

$$\Delta_{Imax} := K_{Imax} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}}\right)^2}$$

Δ_Imax = 0.261

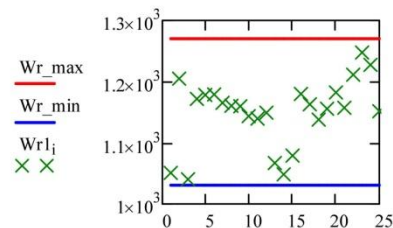
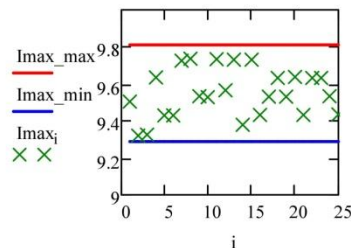
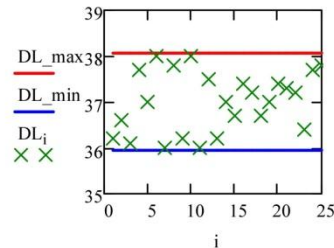
ξ_Imax = 0.054

Imax_max := mean(Imax) + Δ_Imax

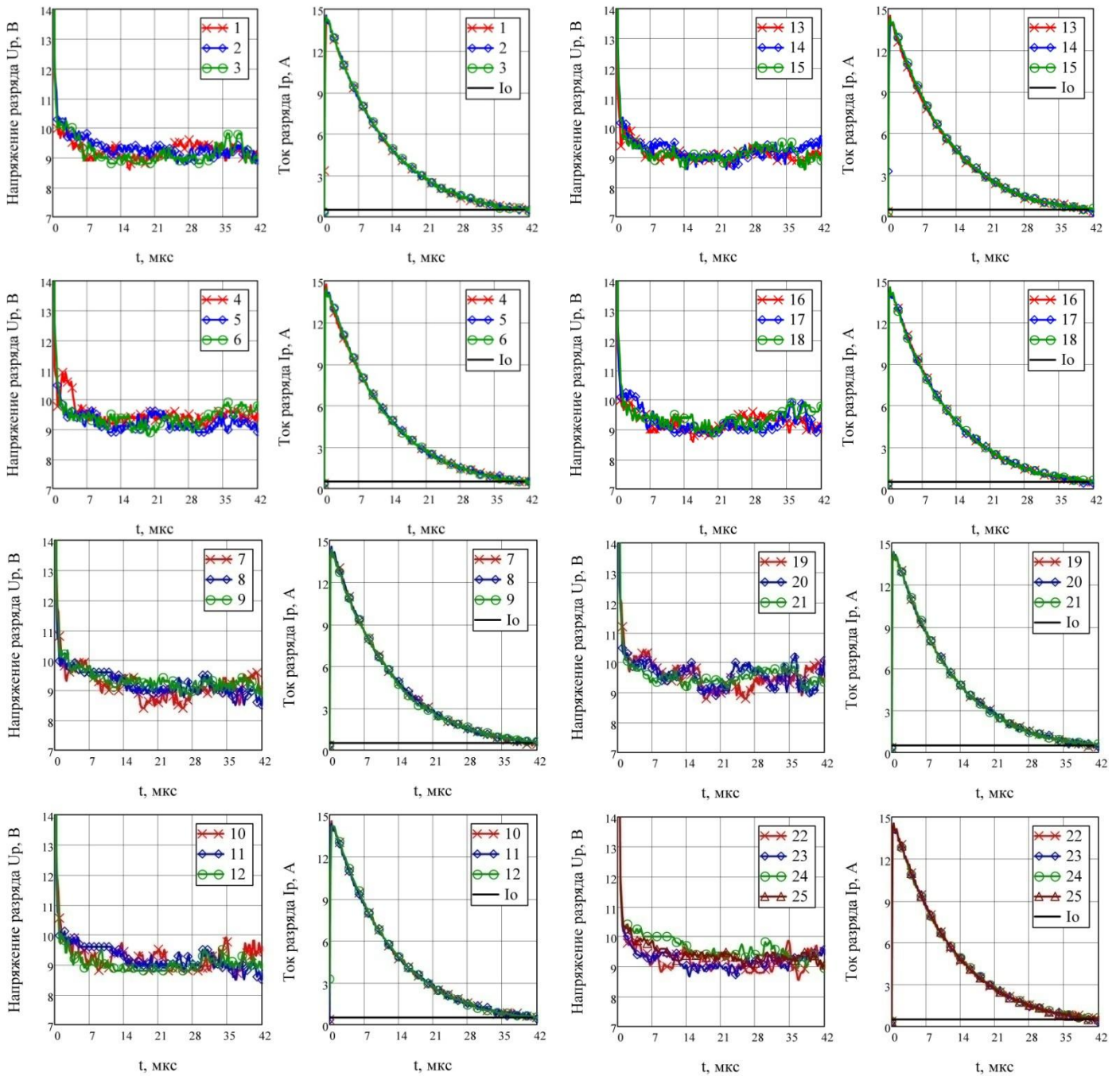
Imax_min := mean(Imax) - Δ_Imax

Imax_max = 9.811

Imax_min = 9.288



А.5. Осциллограммы разрядов при напряжении 70 В и полярности вольфрам – катод



А.6. Листинг программы обработки результатов измерений (70В)

Массив средних значений длительности DL, энергии Wr разряда и максимального тока Imax

	1
1	40.9
2	40.8
3	41.1
4	41.1
5	42
6	41.9
7	40
8	40.7
9	40
10	40.2
11	41
12	40.6
13	40.9
14	41
15	41.1
16	40.8
17	41.9
18	41.9
19	40.1
20	41
21	42.1
22	40.2
23	41
24	41.7
25	41.6

	1
1	1634.1
2	1566.1
3	1633.7
4	1554.6
5	1541.8
6	1533.4
7	1524.3
8	1549.6
9	1532.4
10	1522.6
11	1470.8
12	1618
13	1524.1
14	1465.9
15	1614.4
16	1493.8
17	1524.5
18	1508.6
19	1522
20	1651.5
21	1519.7
22	1545.4
23	1651.7
24	1657.3
25	1581.9

	1
1	14.2
2	14.3
3	14.2
4	14.5
5	14.1
6	14.4
7	14.1
8	14.5
9	14.3
10	14.5
11	14.3
12	14.2
13	14.5
14	14.2
15	14.3
16	14.2
17	14.3
18	14.3
19	14.1
20	14.3
21	14.3
22	14.5
23	14.3
24	14.4
25	14.2

Среднее арифметическое значение

$$\text{mean(DL)} = 41.02$$

$$\text{mean(Wr)} = 1.56 \times 10^3$$

$$\text{mean(I}_{\text{max}}) = 14.3$$

Смещенное среднее квадратическое отклонение

$$\text{stdev(DL)} = 0.631$$

$$\text{stdev(Wr)} = 55.907$$

$$\text{stdev(I}_{\text{max}}) = 0.128$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\text{SKO_DL} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{DL}_i - \text{mean(DL)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_DL} = 0.644$$

$$\text{SKO_Wr} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{Wr}_i - \text{mean(Wr)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_Wr} = 57.06$$

$$\text{SKO_I}_{\text{max}} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{I}_{\text{max}_i} - \text{mean(I}_{\text{max}})})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_I}_{\text{max}} = 0.13$$

Исключение грубых погрешностей по критерию Граббса

$$\text{G1_DL} := \frac{|\max(\text{sort(DL)}) - \text{mean(DL)}|}{\text{SKO_DL}} \quad \text{G1_Wr} := \frac{|\max(\text{sort(Wr)}) - \text{mean(Wr)}|}{\text{SKO_Wr}}$$

$$\text{G2_DL} := \frac{|\min(\text{sort(DL)}) - \text{mean(DL)}|}{\text{SKO_DL}} \quad \text{G2_Wr} := \frac{|\min(\text{sort(Wr)}) - \text{mean(Wr)}|}{\text{SKO_Wr}}$$

$$\text{G1_DL} = 1.671 \quad \text{G2_DL} = 1.591$$

$$\text{G1_Wr} = 1.746 \quad \text{G2_Wr} = 1.608$$

$$\text{G1_I}_{\text{max}} := \frac{|\max(\text{sort(I}_{\text{max}})}) - \text{mean(I}_{\text{max}})|}{\text{SKO_I}_{\text{max}}}$$

$$\text{G2_I}_{\text{max}} := \frac{|\min(\text{sort(I}_{\text{max}})}) - \text{mean(I}_{\text{max}})|}{\text{SKO_I}_{\text{max}}}$$

$$\text{G1_I}_{\text{max}} = 1.611 \quad \text{G2_I}_{\text{max}} = 1.495$$

Теоретическое значение Gt при уровне значимости 5% Gt=2.822

Проверка принадлежности выборки к нормальному закону

$$d_{DL} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|DL_i - \text{mean}(DL)|)}{25 \cdot \text{stdev}(DL)} \quad d_{DL} = 0.781$$

$$d_{Wr} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Wr_i - \text{mean}(Wr)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Wr)} \quad d_{Wr} = 0.843$$

$$d_{Imax} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Imax_i - \text{mean}(Imax)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Imax)} \quad d_{Imax} = 0.785$$

Квантили распределения

d(1-q)=0,7360 d(q)=0,8686 Верхний квантиль ф-ции Лапласа принят 2,17

2.17·SKO DL = 1.397 2.17·SKO Wr = 123.821 2.17·SKO Imax = 0.283

Разность массива

i := 1..25

$$K_{DL_i} := |DL_i - \text{mean}(DL)|$$

$$K_{Wr_i} := |Wr_i - \text{mean}(Wr)|$$

$$K_{Imax_i} := |Imax_i - \text{mean}(Imax)|$$

Доверительные границы случайной погрешности. Коэф. Стьюдента 2,064 при доверительной вероятности 0,95

$$\xi_{DL} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}} \quad \xi_{DL} = 0.266$$

$$\xi_{Wr} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}} \quad \xi_{Wr} = 23.555$$

$$\xi_{Imax} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}} \quad \xi_{Imax} = 0.054$$

DL max := mean(DL) + ξ_{DL} DL max = 41.29

DL min := mean(DL) - ξ_{DL} DL min = 40.758

Wr max := mean(Wr) + ξ_{Wr} Wr max = 1.581×10^3

Wr min := mean(Wr) - ξ_{Wr} Wr min = 1.534×10^3

Imax max := mean(Imax) + ξ_{Imax} Imax max = 14.39

Imax min := mean(Imax) - ξ_{Imax} Imax min = 14.282

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

Коэффициент

$$K_{DL} := \frac{\xi_{DL} + 0.1 \cdot 10}{\frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}} \quad K_{DL} = 1.793$$

$$K_{Wr} := \frac{\xi_{Wr} + 0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}} \quad K_{Wr} = 1.769$$

$$K_{Imax} := \frac{\xi_{Imax} + 0.05 \cdot 5}{\frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}} + \frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}} \quad K_{Imax} = 1.783$$

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

$$\Delta_{DL} := K_{DL} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_{DL} = 1.06$$

$$\Delta_{Wr} := K_{Wr} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_{Wr} = 160.406$$

$\xi_{DL} = 0.266$

DL_max := mean(DL) + Δ_{DL} DL_max = 42.084

DL_min := mean(DL) - Δ_{DL} DL_min = 39.964

$\xi_{Wr} = 23.555$

Wr_max := mean(Wr) + Δ_{Wr} Wr_max = 1.718×10^3

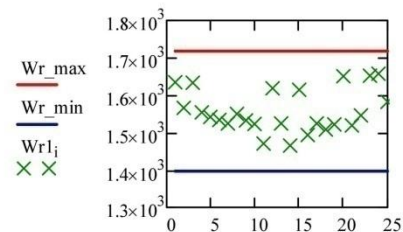
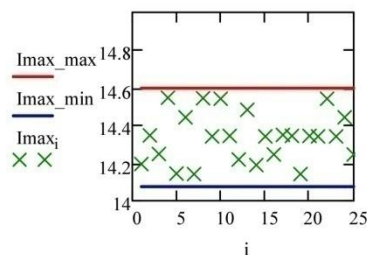
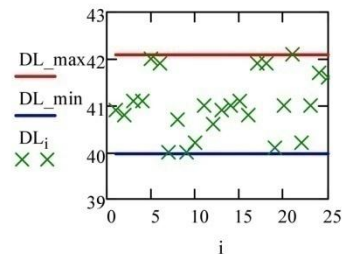
Wr_min := mean(Wr) - Δ_{Wr} Wr_min = 1.397×10^3

$$\Delta_{Imax} := K_{Imax} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_{Imax} = 0.262$$

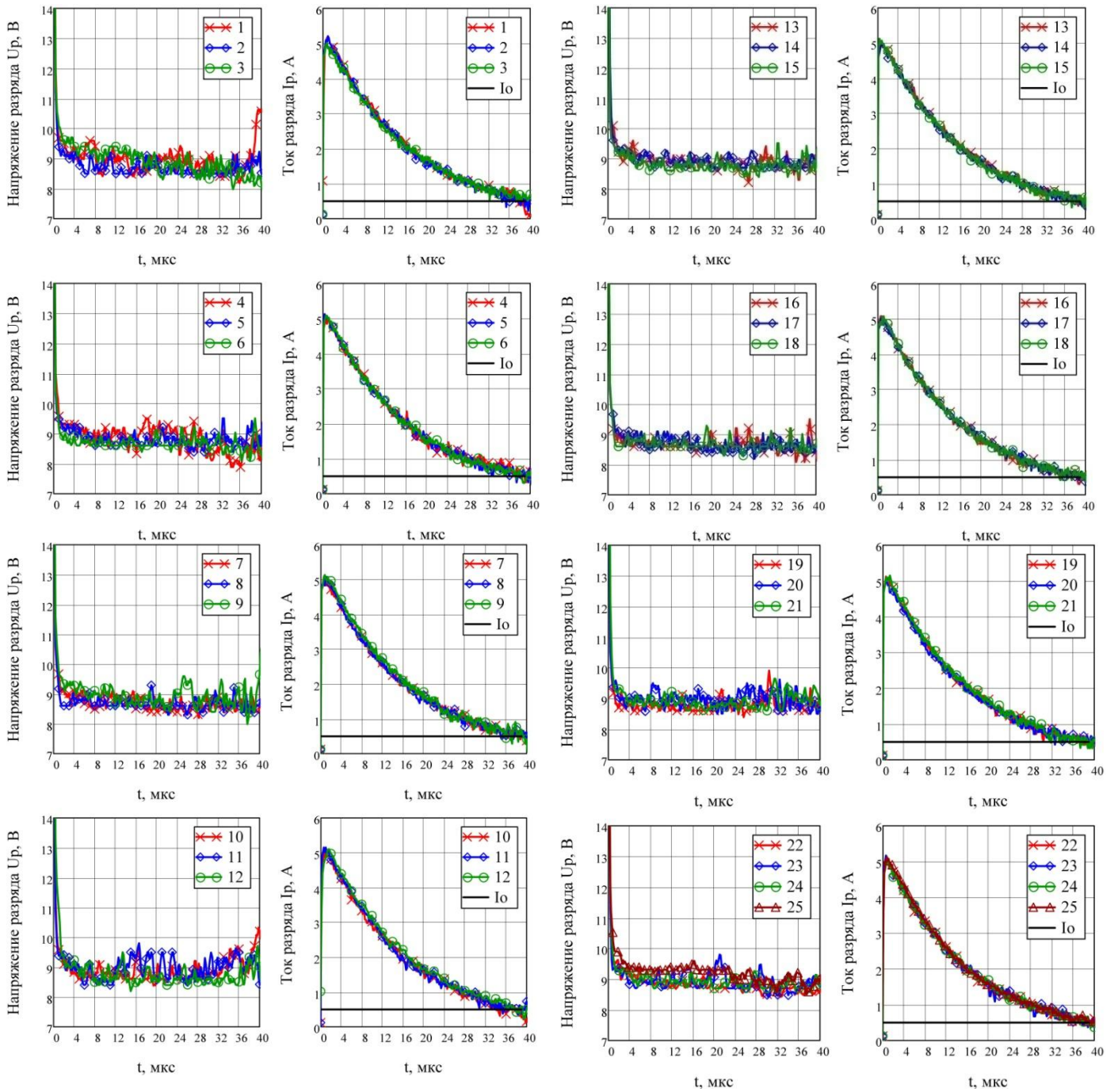
$\xi_{Imax} = 0.054$

Imax_max := mean(Imax) + Δ_{Imax} Imax_max = 14.598

Imax_min := mean(Imax) - Δ_{Imax} Imax_min = 14.074



А.7. Осциллограммы разрядов при напряжении 30 В и полярности вольфрам – анод



А.8. Листинг программы обработки результатов измерений (30В)

	1
DL = 1	39.8
2	39.4
3	39.8
4	38.2
5	38.8
6	38.4
7	38.2
8	41.4
9	40
10	38.6
11	38.2
12	38.8
13	39.6
14	38.4
15	38.2
16	38.4
17	38.6
18	39
19	38.2
20	39.4
21	38.6
22	39.2
23	38.6
24	39
25	40.1
26	

	1
Wr = 1	654.9
2	723.7
3	664.5
4	720.3
5	672.8
6	718.6
7	702.7
8	675.4
9	743.9
10	687.2
11	718.2
12	648.4
13	716
14	663
15	683.9
16	651.3
17	657.5
18	635
19	653.9
20	694.2
21	683
22	727
23	693.7
24	698.4
25	722

	1
Imax = 1	5.2
2	5.2
3	5
4	5
5	5.1
6	5
7	5
8	5
9	5.1
10	5
11	5.1
12	5.1
13	5
14	4.9
15	5.1
16	5.1
17	5
18	5.1
19	5.1
20	5
21	5.1
22	5.1
23	5.2
24	5
25	5.1

Среднее арифметическое значение

mean(DL) = 39
 mean(Wr) = 688.39
 mean(Imax) = 5.1

Смещенное среднее квадратическое отклонение

stdev(DL) = 0.774
 stdev(Wr) = 29.449
 stdev(Imax) = 0.073

Среднее квадратическое отклонение

$$SKO_DL := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (DL_i - \text{mean}(DL))^2}{24}}$$

SKO_DL = 0.79

$$SKO_Wr := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (Wr_i - \text{mean}(Wr))^2}{24}}$$

SKO_Wr = 30.056

$$SKO_Imax := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (Imax_i - \text{mean}(Imax))^2}{24}}$$

SKO_Imax = 0.075

Исключение грубых погрешностей по критерию Граббса

$$G1_DL := \frac{|\max(\text{sort}(DL)) - \text{mean}(DL)|}{SKO_DL} \quad G1_Wr := \frac{|\max(\text{sort}(Wr)) - \text{mean}(Wr)|}{SKO_Wr}$$

$$G2_DL := \frac{|\min(\text{sort}(DL)) - \text{mean}(DL)|}{SKO_DL} \quad G2_Wr := \frac{|\min(\text{sort}(Wr)) - \text{mean}(Wr)|}{SKO_Wr}$$

G1_DL = 3.044 G2_DL = 1.008

G1_Wr = 1.848 G2_Wr = 1.777

$$G1_Imax := \frac{|\max(\text{sort}(Imax)) - \text{mean}(Imax)|}{SKO_Imax}$$

$$G2_Imax := \frac{|\min(\text{sort}(Imax)) - \text{mean}(Imax)|}{SKO_Imax}$$

G1_Imax = 1.795 G2_Imax = 1.913

Теоретическое значение Gт при уровне значимости 5% Gт=2.822

Проверка принадлежности выборки к нормальному закону

$$d_{DL} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|DL_i - \text{mean}(DL)|)}{25 \cdot \text{stdev}(DL)} \quad d_{DL} = 0.801$$

$$d_{Imax} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Imax_i - \text{mean}(Imax)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Imax)} \quad d_{Imax} = 0.858$$

$$d_{Wr} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Wr_i - \text{mean}(Wr)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Wr)} \quad d_{Wr} = 0.865$$

Квантили распределения

d(1-q)=0,7360 d(q)=0,8686 Верхний квантиль ф-ции Лапласа принят 2,17

2.17·SKO DL = 1.714 2.17·SKO Wr = 65.221 2.17·SKO Imax = 0.163

Разность массива Сортировка по возрастанию массива разностей

i := 1..25

$K_{DL_i} := |DL_i - \text{mean}(DL)|$

$K_{Wr_i} := |Wr_i - \text{mean}(Wr)|$

$K_{Imax_i} := |Imax_i - \text{mean}(Imax)|$

sort(K_DL) =

1	1,477·10 ⁻³
2	3,658·10 ⁻³
3	4,941·10 ⁻³
4	...

sort(K_Wr) =

1	4·10 ⁻³
2	4·10 ⁻³
3	0.196
4	...

sort(K_Imax) =

1	1.14
2	4.495
3	5.362
4	...

Доверительные границы случайной погрешности. Коэф. Стьюдента 2,064 при доверительной вероятности 0,95

$$\xi_{DL} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}} \quad \xi_{DL} = 0.326$$

$$\xi_{Wr} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}} \quad \xi_{Wr} = 12.407$$

$$\xi_{Imax} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}} \quad \xi_{Imax} = 0.031$$

DL_max := mean(DL) + ξ_{DL} DL_min := mean(DL) - ξ_{DL} DL_max = 39.322 DL_min = 38.67

Wr_max := mean(Wr) + ξ_{Wr} Wr_min := mean(Wr) - ξ_{Wr} Wr_max = 700.794 Wr_min = 675.98

Imax_max := mean(Imax) + ξ_{Imax} Imax_min := mean(Imax) - ξ_{Imax} Imax_max = 5.1 Imax_min = 5.038

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

Коэффициент

$$K_{DL} := \frac{\xi_{DL} + 0.1 \cdot 10}{\frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}} \quad K_{DL} = 1.803$$

$$K_{Wr} := \frac{\xi_{Wr} + 0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}} \quad K_{Wr} = 1.776$$

$$K_{Imax} := \frac{\xi_{Imax} + 0.05 \cdot 5}{\frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}} + \frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}} \quad K_{Imax} = 1.763$$

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

$$\Delta_{DL} := K_{DL} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_{DL} = 1.079$$

$$\Delta_{Wr} := K_{Wr} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_{Wr} = 71.375$$

$$\Delta_{Imax} := K_{Imax} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_{Imax} = 0.256$$

$\xi_{DL} = 0.326$

$DL_{max} := \text{mean}(DL) + \Delta_{DL}$ $DL_{min} := \text{mean}(DL) - \Delta_{DL}$ $DL_{max} = 40.075$ $DL_{min} = 37.917$

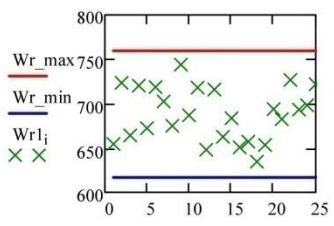
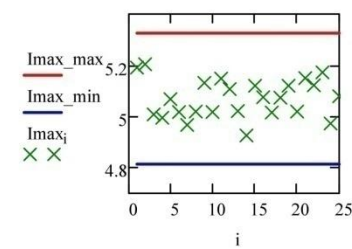
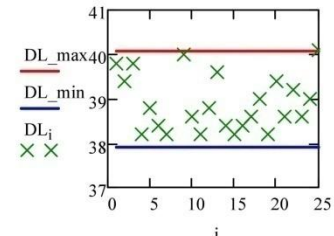
$\xi_{Wr} = 12.407$

$Wr_{max} := \text{mean}(Wr) + \Delta_{Wr}$ $Wr_{min} := \text{mean}(Wr) - \Delta_{Wr}$ $Wr_{max} = 759.762$ $Wr_{min} = 617.013$

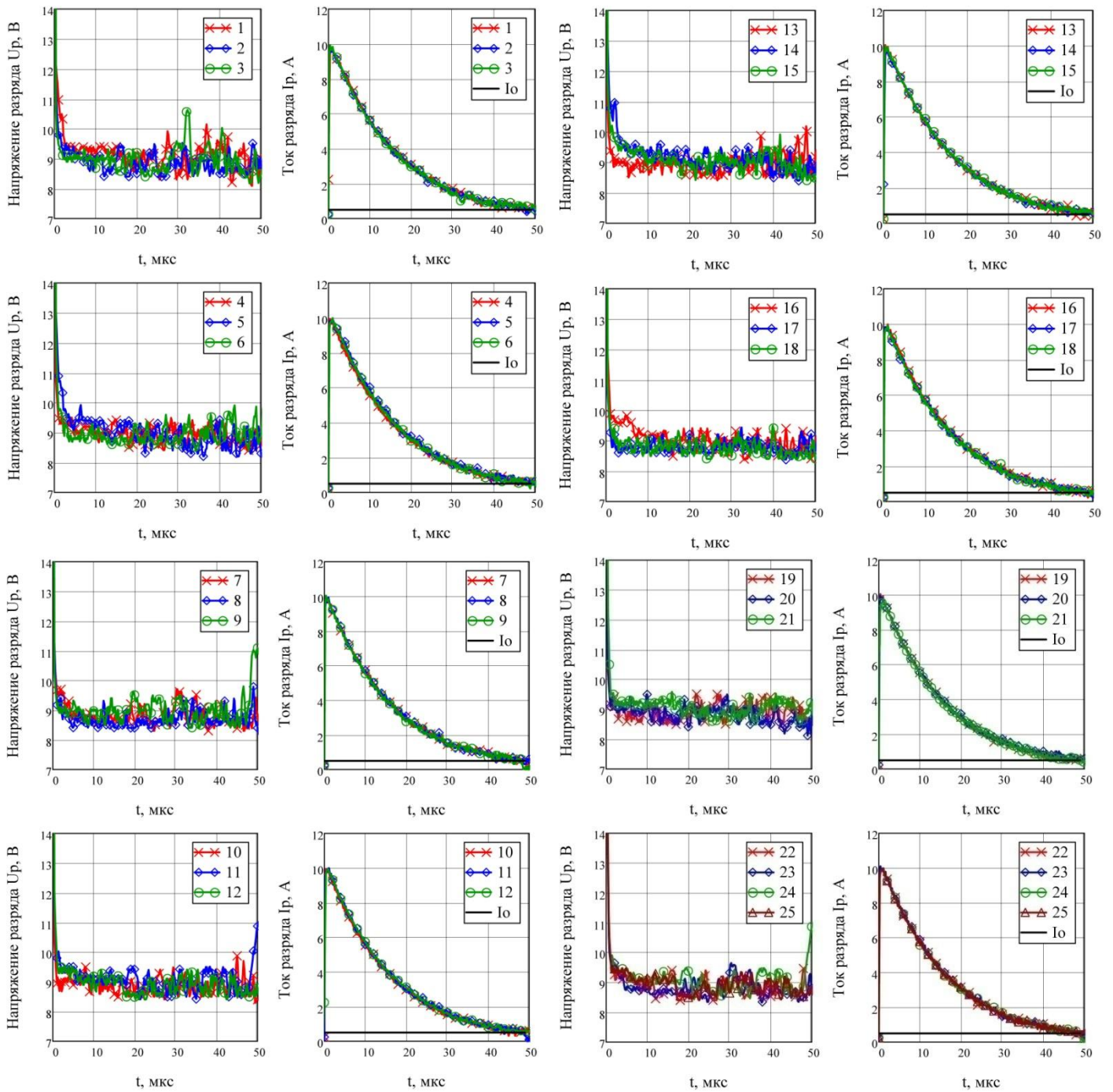
$\Delta_{Imax} = 0.256$

$\xi_{Imax} = 0.031$

$Imax_{max} := \text{mean}(Imax) + \Delta_{Imax}$ $Imax_{min} := \text{mean}(Imax) - \Delta_{Imax}$ $Imax_{max} = 5.325$ $Imax_{min} = 4.814$



А.9. Осциллограммы разряда при напряжении 50 В и полярности вольфрам - анод



А.10. Листинг программы обработки результатов измерений (50В)

Массив средних значений длительности DL, энергии Wr разряда и максимального тока Imax

	1
1	50
2	49.3
3	49.9
4	49.5
5	49.2
6	49.1
7	49.4
8	48
9	48.2
10	48.5
11	48.3
12	49.2
13	48.3
14	49.6
15	48.4
16	50
17	48.6
18	48.9
19	49.9
20	49.2
21	48.9
22	49.3
23	48.9
24	48
25	49.9

	1
1	1540.9
2	1438.3
3	1448.3
4	1461.4
5	1465.8
6	1477.9
7	1442.6
8	1379.7
9	1415.3
10	1402.1
11	1505.4
12	1510
13	1361.4
14	1386
15	1448.1
16	1303.3
17	1335.8
18	1556.5
19	1462.8
20	1360.1
21	1292.6
22	1486.6
23	1401.1
24	1427.4
25	1334.4

	1
1	9.8
2	9.8
3	9.9
4	9.9
5	9.9
6	10
7	9.8
8	9.9
9	10
10	9.9
11	10.2
12	9.9
13	10
14	9.9
15	10
16	9.7
17	9.9
18	9.9
19	10
20	9.9
21	9.7
22	10
23	10.1
24	10.2
25	10.1

Среднее арифметическое значение

$$\text{mean(DL)} = 49.06$$

$$\text{mean(Wr)} = 1.43 \times 10^3$$

$$\text{mean(Imax)} = 10$$

Смещенное среднее квадратическое отклонение

$$\text{stdev(DL)} = 0.627$$

$$\text{stdev(Wr)} = 68.858$$

$$\text{stdev(Imax)} = 0.114$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\text{SKO_DL} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{DL}_i - \text{mean(DL)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_DL} = 0.64$$

$$\text{SKO_Wr} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{Wr}_i - \text{mean(Wr)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_Wr} = 70.277$$

$$\text{SKO_Imax} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{Imax}_i - \text{mean(Imax)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_Imax} = 0.116$$

Исключение грубых погрешностей по критерию Граббса

$$\text{G1_DL} := \frac{|\max(\text{sort(DL)}) - \text{mean(DL)}|}{\text{SKO_DL}} \quad \text{G1_Wr} := \frac{|\max(\text{sort(Wr)}) - \text{mean(Wr)}|}{\text{SKO_Wr}}$$

$$\text{G2_DL} := \frac{|\min(\text{sort(DL)}) - \text{mean(DL)}|}{\text{SKO_DL}} \quad \text{G2_Wr} := \frac{|\min(\text{sort(Wr)}) - \text{mean(Wr)}|}{\text{SKO_Wr}}$$

$$\text{G1_DL} = 1.468$$

$$\text{G2_DL} = 1.655$$

$$\text{G1_Wr} = 1.861$$

$$\text{G2_Wr} = 1.895$$

$$\text{G1_Imax} := \frac{|\max(\text{sort(Imax)}) - \text{mean(Imax)}|}{\text{SKO_Imax}}$$

$$\text{G2_Imax} := \frac{|\min(\text{sort(Imax)}) - \text{mean(Imax)}|}{\text{SKO_Imax}}$$

$$\text{G1_Imax} = 2.032$$

$$\text{G2_Imax} = 1.934$$

Теоретическое значение Gт при уровне значимости 5% Gт=2.822

Проверка принадлежности выборки к нормальному закону

$$d_{DL} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|DL_i - \text{mean}(DL)|)}{25 \cdot \text{stdev}(DL)}$$

$$d_{DL} = 0.849$$

$$d_{Wr} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Wr_i - \text{mean}(Wr)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Wr)}$$

$$d_{Wr} = 0.827$$

$$d_{Imax} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Imax_i - \text{mean}(Imax)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Imax)}$$

$$d_{Imax} = 0.755$$

Квантили распределения

d(1-q)=0,7360 d(q)=0,8686

Верхний квантиль ф-ции Лапласа принят 2,17

2.17·SKO DL = 1.389

2.17·SKO Wr = 152.502

2.17·SKO Imax = 0.252

Разность массива

i := 1..25

K_DL_i := |DL_i - mean(DL)|

K_Wr_i := |Wr_i - mean(Wr)|

K_Imax_i := |Imax_i - mean(Imax)|

Доверительные границы случайной погрешности. Коэф. Стьюдента 2,064 при доверительной вероятности 0,95

$$\xi_{DL} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}}$$

$$\xi_{DL} = 0.264$$

$$\xi_{Wr} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}}$$

$$\xi_{Wr} = 29.011$$

$$\xi_{Imax} := 2.064 \cdot \frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}}$$

$$\xi_{Imax} = 0.048$$

DL max := mean(DL) + ξ_DL

DL max = 49.324

DL min := mean(DL) - ξ_DL

DL_min = 48.796

Wr max := mean(Wr) + ξ_Wr

Wr max = 1.455 × 10³

Wr min := mean(Wr) - ξ_Wr

Wr min = 1.397 × 10³

Imax max := mean(Imax) + ξ_Imax

Imax max = 10.006

Imax min := mean(Imax) - ξ_Imax

Imax_min = 9.91

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

Коэффициент

$$K_{DL} := \frac{\xi_{DL} + 0.1 \cdot 10}{\frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}}$$

$$K_{Wr} := \frac{\xi_{Wr} + 0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}}$$

$$K_{Imax} := \frac{\xi_{Imax} + 0.05 \cdot 5}{\frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}} + \frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}}$$

K_DL = 1.792

K_Wr = 1.78

K_Imax = 1.778

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

$$\Delta_{DL} := K_{DL} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{DL}}{\sqrt{25}}\right)^2}$$

$$\Delta_{Wr} := K_{Wr} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{Wr}}{\sqrt{25}}\right)^2}$$

Δ DL = 1.06

ξ DL = 0.264

DL_max := mean(DL) + Δ_DL

DL_min := mean(DL) - Δ_DL

DL_max = 50.12

DL_min = 48

Δ Wr = 148.682

ξ Wr = 29.011

Wr_max := mean(Wr) + Δ_Wr

Wr_min := mean(Wr) - Δ_Wr

Wr_max = 1.574 × 10³

Wr_min = 1.277 × 10³

$$\Delta_{Imax} := K_{Imax} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_{Imax}}{\sqrt{25}}\right)^2}$$

Δ Imax = 0.26

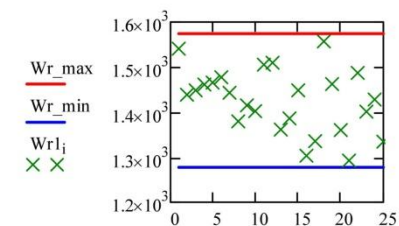
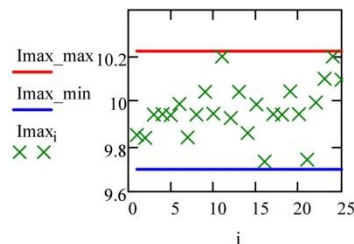
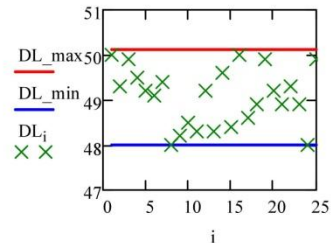
ξ Imax = 0.048

Imax_max := mean(Imax) + Δ_Imax

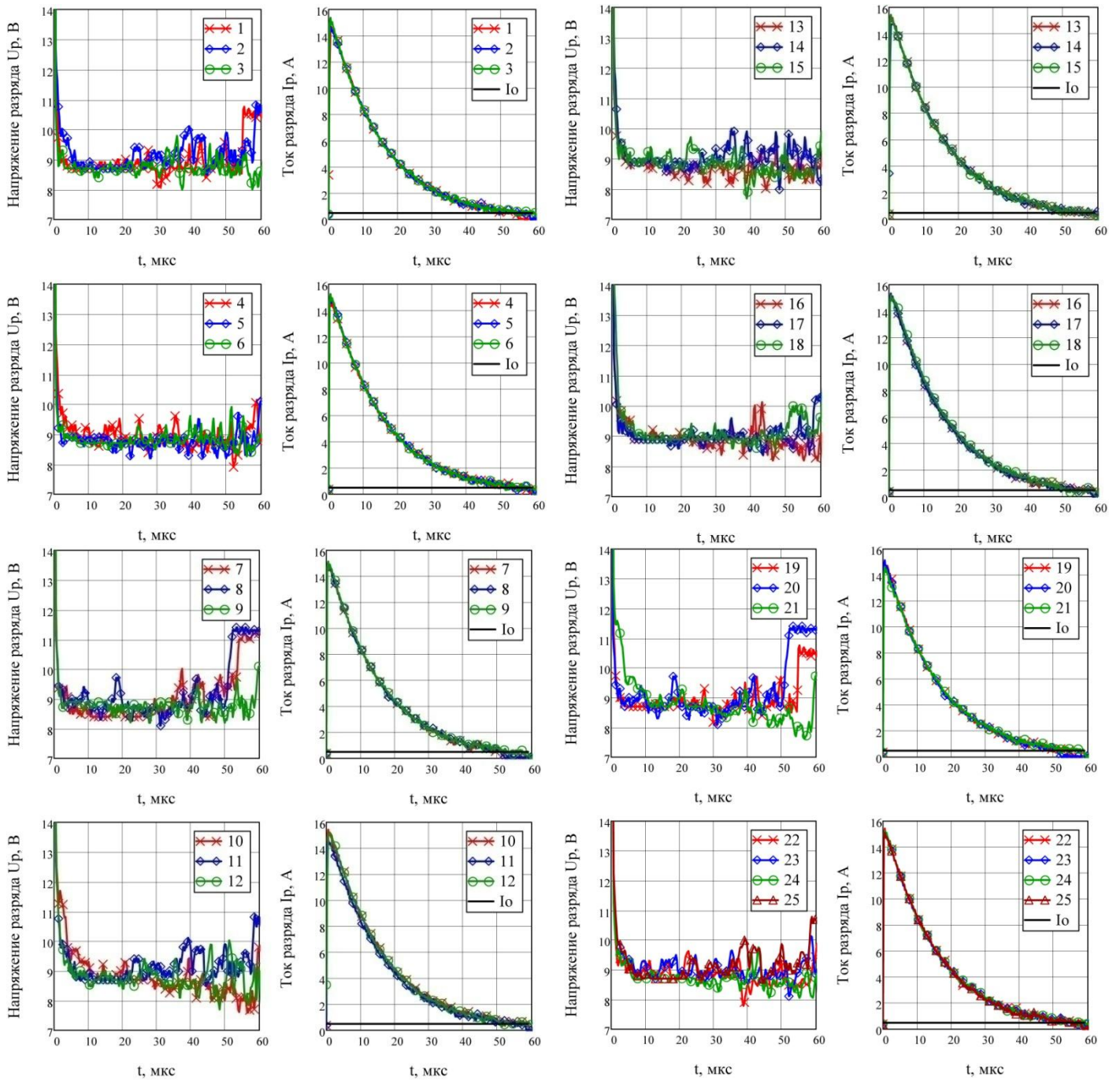
Imax_min := mean(Imax) - Δ_Imax

Imax_max = 10.218

Imax_min = 9.698



A.11. Осциллограммы разряда при напряжении 70 В и полярности вольфрам - анод



A.12. Листинг программы обработки результатов измерений (70В)

Массив средних значений длительности DL, энергии Wr разряда и максимального тока Imax

	1
1	56.2
2	55
3	55.6
4	56.8
5	55
6	56.4
7	56.3
8	56.4
9	55.6
10	55.4
11	56.6
12	56.2
13	55.2
14	56
15	56
16	56
17	54.9
18	56.3
19	56.2
20	56.4
21	56.4
22	57
23	55.8
24	56
25	56

DL =

	1
1	2195.4
2	2239.5
3	2168.9
4	2238.8
5	2187.9
6	2169.3
7	2140.4
8	2176.7
9	2141.9
10	2320
11	2287.2
12	2330.9
13	2082.3
14	1981.3
15	2116.7
16	1979.8
17	2148.8
18	2048.1
19	2175.9
20	2028.7
21	2047.9
22	2297.2
23	2173.9
24	2122.1
25	2000.8

Wr =

	1
1	15.1
2	15.1
3	15.5
4	15.3
5	15.1
6	15.2
7	15.4
8	15.1
9	15.2
10	15.4
11	15.2
12	15.1
13	15.4
14	15.3
15	15.4
16	15.2
17	15.3
18	15.2
19	15.4
20	15.1
21	15.5
22	15.4
23	15.2
24	15.2
25	15.1

Imax =

Среднее арифметическое значение

$$\text{mean(DL)} = 55.99$$

$$\text{mean(Wr)} = 2.15 \times 10^3$$

$$\text{mean(Imax)} = 15.3$$

Смещенное среднее квадратическое отклонение

$$\text{stdev(DL)} = 0.548$$

$$\text{stdev(Wr)} = 99.183$$

$$\text{stdev(Imax)} = 0.129$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\text{SKO_DL} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{DL}_i - \text{mean(DL)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_DL} = 0.559$$

$$\text{SKO_Wr} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{Wr}_i - \text{mean(Wr)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_Wr} = 101.228$$

$$\text{SKO_Imax} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (\text{Imax}_i - \text{mean(Imax)})^2}{24}}$$

$$\text{SKO_Imax} = 0.132$$

Исключение грубых погрешностей по критерию Граббса

$$\text{G1_DL} := \frac{|\max(\text{sort(DL)}) - \text{mean(DL)}|}{\text{SKO_DL}} \quad \text{G1_Wr} := \frac{|\max(\text{sort(Wr)}) - \text{mean(Wr)}|}{\text{SKO_Wr}}$$

$$\text{G2_DL} := \frac{|\min(\text{sort(DL)}) - \text{mean(DL)}|}{\text{SKO_DL}} \quad \text{G2_Wr} := \frac{|\min(\text{sort(Wr)}) - \text{mean(Wr)}|}{\text{SKO_Wr}}$$

$$\text{G1_DL} = 1.81$$

$$\text{G2_DL} = 1.945$$

$$\text{G1_Wr} = 1.767 \quad \text{G2_Wr} = 1.701$$

$$\text{G1_Imax} := \frac{|\max(\text{sort(Imax)}) - \text{mean(Imax)}|}{\text{SKO_Imax}}$$

$$\text{G2_Imax} := \frac{|\min(\text{sort(Imax)}) - \text{mean(Imax)}|}{\text{SKO_Imax}}$$

$$\text{G1_Imax} = 1.751$$

$$\text{G2_Imax} = 1.227$$

Теоретическое значение Gt при уровне значимости 5% Gt=2.822

Проверка принадлежности выборки к нормальному закону

$$d_DL := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|DL_i - \text{mean}(DL)|)}{25 \cdot \text{stdev}(DL)} \quad d_DL = 0.789$$

$$d_Wr := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Wr_i - \text{mean}(Wr)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Wr)} \quad d_Wr = 0.795$$

$$d_Imax := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|Imax_i - \text{mean}(Imax)|)}{25 \cdot \text{stdev}(Imax)} \quad d_Imax = 0.904$$

Квантили распределения

d(1-q)=0,7360 d(q)=0,8686 Верхний квантиль ф-ции Лапласа принят 2,17

2.17·SKO DL = 1.214 2.17·SKO Wr = 219.665 2.17·SKO Imax = 0.285

Разность массива

i := 1 .. 25

$$K_DL_i := |DL_i - \text{mean}(DL)|$$

$$K_Wr_i := |Wr_i - \text{mean}(Wr)|$$

$$K_Imax_i := |Imax_i - \text{mean}(Imax)|$$

Доверительные границы случайной погрешности. Коэф. Стьюдента 2,064 при доверительной вероятности 0,95

$$\xi_DL := 2.064 \cdot \frac{SKO_DL}{\sqrt{25}} \quad \xi_DL = 0.231$$

$$\xi_Wr := 2.064 \cdot \frac{SKO_Wr}{\sqrt{25}} \quad \xi_Wr = 41.787$$

$$\xi_Imax := 2.064 \cdot \frac{SKO_Imax}{\sqrt{25}} \quad \xi_Imax = 0.054$$

DL max := mean(DL) + ξ_DL DL min := mean(DL) - ξ_DL DL_min = 55.757

Wr max := mean(Wr) + ξ_Wr Wr max = 2.194×10^3 Wr min := mean(Wr) - ξ_Wr Wr_min = 2.11×10^3

Imax max := mean(Imax) + ξ_Imax Imax max = 15.337

Imax min := mean(Imax) - ξ_Imax Imax_min = 15.228

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

Коэффициент

$$K_DL := \frac{\xi_DL + 0.1 \cdot 10}{\frac{SKO_DL}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}} \quad K_Wr := \frac{\xi_Wr + 0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\frac{SKO_Wr}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}} \quad K_Imax := \frac{\xi_Imax + 0.05 \cdot 5}{\frac{SKO_Imax}{\sqrt{25}} + \frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}}$$

K_DL = 1.786 K_Wr = 1.779 K_Imax = 1.783

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

$$\Delta_DL := K_DL \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot 10}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_DL}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_DL = 1.05$$

$$\Delta_Wr := K_Wr \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot \text{mean}(Wr)}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_Wr}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_Wr = 223.896$$

$\xi_DL = 0.231$ $\xi_Wr = 41.787$

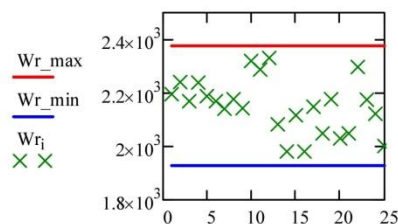
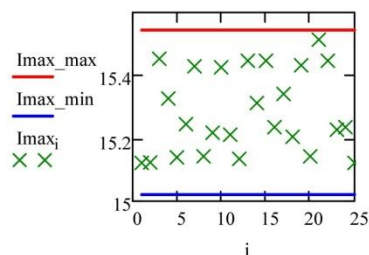
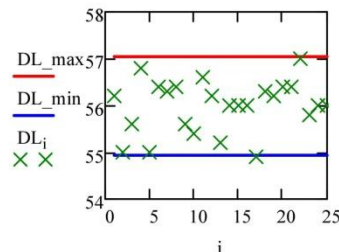
DL_max := mean(DL) + Δ_DL DL_min := mean(DL) - Δ_DL DL_max = 57.038 DL_min = 54.938

Wr_max := mean(Wr) + Δ_Wr Wr_min := mean(Wr) - Δ_Wr Wr_max = 2.376×10^3 Wr_min = 1.928×10^3

$$\Delta_Imax := K_Imax \cdot \sqrt{\left(\frac{0.05 \cdot 5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{SKO_Imax}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_Imax = 0.262$$

$\xi_Imax = 0.054$

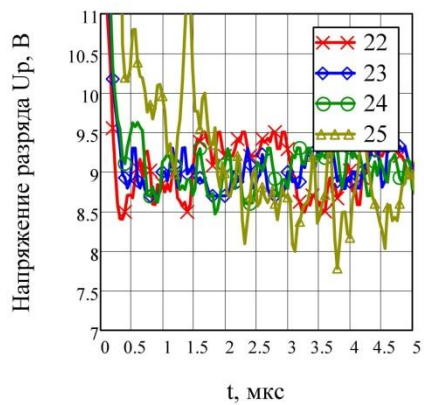
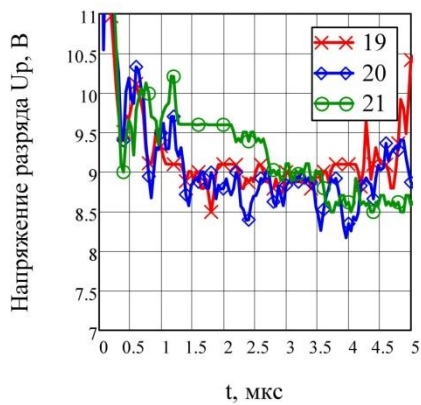
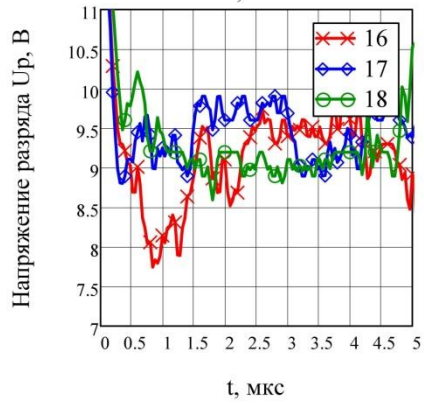
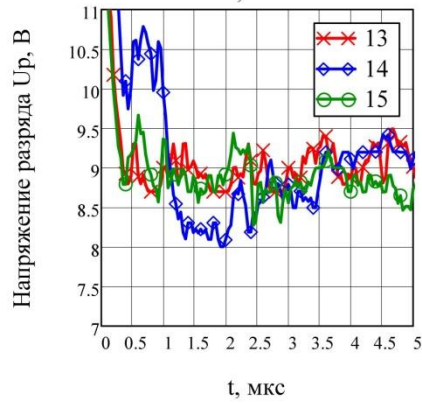
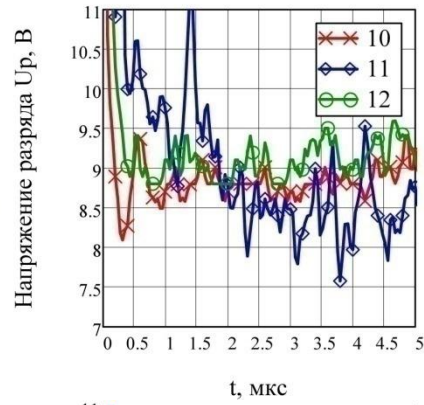
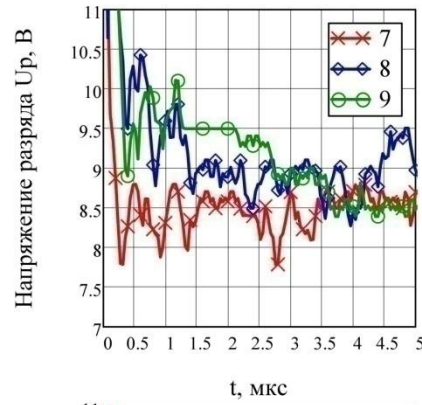
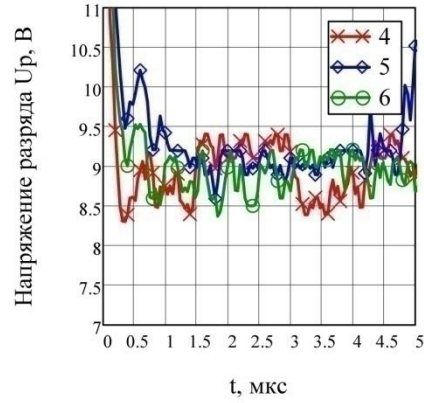
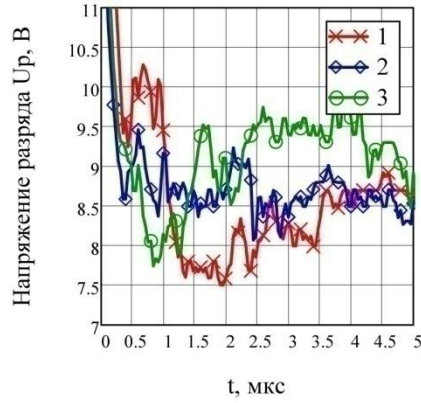
Imax_max := mean(Imax) + Δ_Imax Imax_min := mean(Imax) - Δ_Imax Imax_max = 15.544 Imax_min = 15.021



Приложение Б

Разряды замыкания омической цепи при напряжении 30 В и полярности
вольфрам - анод

Б.1 Установившееся напряжение разряда



Б.2 Листинг программы обработки результатов измерений

Начальные данные

30В; 0 мкФ; 3.8 Ом; 0 мкГн, W+, Ca-

Сопrotивление шунта: Rsh := 3.806 Ip := 0.5

Напряжение цепи: U := 30

ORIGIN := 1

Считывание массивов данных из файлов:

A1 := D:\...\CSV_20176916651.csv A6 := D:\...\CSV_20176916748.csv A11 := D:\...\CSV_20176916642.csv

A24 := D:\...\CSV_20176916748.csv A25 := D:\...\CSV_20176916642.csv A23 := ...\CSV_20176916811.c

Массив средних значений напряжения U0

U0₁ := U0_1 U0₁₁ := U0_11 U0₂₁ := U0_21
 U0₂ := U0_2 U0₁₂ := U0_12 U0₂₂ := U0_22
 U0₃ := U0_3 U0₁₃ := U0_13 U0₂₃ := U0_23
 U0₄ := U0_4 U0₁₄ := U0_14 U0₂₄ := U0_24
 U0₅ := U0_5 U0₁₅ := U0_15 U0₂₅ := U0_25
 U0₆ := U0_6 U0₁₆ := U0_16
 U0₇ := U0_7 U0₁₇ := U0_17
 U0₈ := U0_8 U0₁₈ := U0_18
 U0₉ := U0_9 U0₁₉ := U0_19
 U0₁₀ := U0_10 U0₂₀ := U0_20

	1
1	8.953
2	8.702
3	9
4	9.147
5	9.017
6	9.155
7	8.977
8	9.067
9	8.638
10	9.152
11	8.695
12	9.142
13	8.842
14	9.004
15	8.902
16	8.9
17	9.247
18	8.917
19	9.116
20	8.966
21	8.738
22	9.247
23	9.242
24	9.055
25	8.896

Среднее арифметическое значение mean(U0) = 8.99

Смещенное среднее квадратическое отклонение stdev(U0) = 0.171

Среднее квадратическое отклонение

$$SKO_{U0} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (U0_i - \text{mean}(U0))^2}{24}}$$

SKO_U0 = 0.175

Исключение грубых погрешностей по критерию Граббса

$$G1_{U0} := \frac{|\max(\text{sort}(U0)) - \text{mean}(U0)|}{SKO_{U0}} \quad G1_{U0} = 1.479$$

$$G2_{U0} := \frac{|\min(\text{sort}(U0)) - \text{mean}(U0)|}{SKO_{U0}} \quad G2_{U0} = 2.003$$

Теоретическое значение Gt при уровне значимости 5% Gt=2.822

Проверка принадлежности выборки к нормальному закону

$$d_{U0} := \frac{\sum_{i=1}^{25} (|U0_i - \text{mean}(U0)|)}{25 \cdot \text{stdev}(U0)} \quad d_{U0} = 0.811$$

Квантили распределения

$$d(1-q) = 0,7360 \quad d(q) = 0,8686$$

Верхний квантиль ф-ции Лапласа принят 2,17

$$2.17 \cdot \text{SKO}_{U0} = 0.38$$

Разность массива

$$i := 1..25$$

$$K_{U0_i} := |U0_i - \text{mean}(U0)|$$

Сортировка по возрастанию массива разностей

	1
1	0.011
2	0.012
3	0.015
4	0.022
5	...

Доверительные границы случайной погрешности. Коэф. Стьюдента 2,064 при доверительной вероятности 0,95

$$\xi_{U0} := 2.064 \cdot \frac{\text{SKO}_{U0}}{\sqrt{25}} \quad \xi_{U0} = 0.072$$

$$U0_{\max} := \text{mean}(U0) + \xi_{U0} \quad U0_{\max} = 9.061$$

$$U0_{\min} := \text{mean}(U0) - \xi_{U0} \quad U0_{\min} = 8.916$$

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

Коэффициент

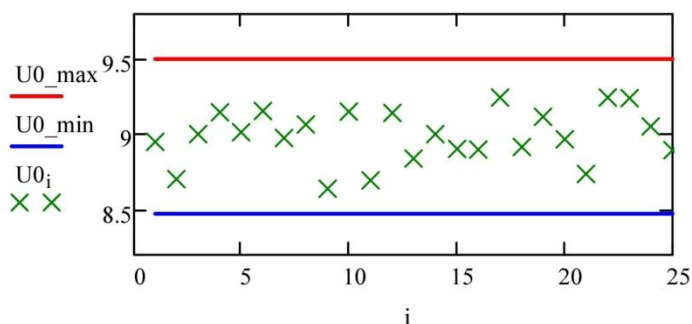
$$K_{U0} := \frac{\xi_{U0} + 0.1 \cdot 5}{\frac{\text{SKO}_{U0}}{\sqrt{25}} + \frac{0.1 \cdot 5}{\sqrt{3}}} \quad K_{U0} = 1.768$$

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

$$\Delta_{U0} := K_{U0} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot 5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\text{SKO}_{U0}}{\sqrt{25}}\right)^2} \quad \Delta_{U0} = 0.514$$

$$U0_{\max} := \text{mean}(U0) + \Delta_{U0} \quad U0_{\max} = 9.503$$

$$U0_{\min} := \text{mean}(U0) - \Delta_{U0} \quad U0_{\min} = 8.475$$



Приложение В

Определение коэффициентов регрессии зависимости минимальной
воспламеняющей энергии от напряжения емкостной
цепи для смесей группы I

Исходные данные энергии разряда W и длительности разряда T при напряжениях 20, 30, 50, 70, 100, 200, 300 В.

$$\begin{aligned}
 W_{20} &:= \begin{pmatrix} 2.079 \\ 2.372 \\ 19.7 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} & T_{20} &:= \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0.0466 \\ 7.510 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} & W_{100} &:= \begin{pmatrix} 0.736 \\ 2.044 \\ 3.816 \\ 7.292 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} & T_{100} &:= \begin{pmatrix} 0.000488 \\ 0.124 \\ 0.546 \\ 2.407 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \\
 W_{30} &:= \begin{pmatrix} 1.361 \\ 5.255 \\ 16.869 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} & T_{30} &:= \begin{pmatrix} 0.0147 \\ 1.157 \\ 8.427 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} & W_{200} &:= \begin{pmatrix} 0.997 \\ 1.442 \\ 2.583 \\ 4.602 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} & T_{200} &:= \begin{pmatrix} 0.00026 \\ 0.043 \\ 0.19 \\ 0.803 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \\
 W_{50} &:= \begin{pmatrix} 0.922 \\ 3.295 \\ 6.579 \\ 21.892 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} & T_{50} &:= \begin{pmatrix} 0.005 \\ 0.407 \\ 1.869 \\ 14.128 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} & W_{300} &:= \begin{pmatrix} 1.195 \\ 1.288 \\ 2.022 \\ 3.915 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} & T_{300} &:= \begin{pmatrix} 0.000151 \\ 0.0237 \\ 0.1 \\ 0.472 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \\
 W_{70} &:= \begin{pmatrix} 0.801 \\ 2.672 \\ 4.677 \\ 11.945 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} & T_{70} &:= \begin{pmatrix} 0.0025 \\ 0.232 \\ 0.945 \\ 5.532 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$

Введите соответствующий вектор функции и аргумента.

Для напряжений 20...50 В функция модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot \sqrt{x} + c \cdot x$;

Для напряжений 50...100 В функция модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot \sqrt{x} + c \cdot x + d$;

Для напряжений 100...300 В функция модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot \sqrt{x} + c$.

где a , b , c и d неизвестны.

Для напряжений 20...50 В

$$X_{20} := T_{20} \quad Y_{20} := W_{20}$$

$$X_{30} := T_{30} \quad Y_{30} := W_{30}$$

$$X_{50} := T_{50} \quad Y_{50} := W_{50}$$

Для напряжений 50...100В

$$X_{50} := T_{50} \quad Y_{50} := W_{50}$$

$$X_{70} := T_{70} \quad Y_{70} := W_{70}$$

$$X_{100} := T_{100} \quad Y_{100} := W_{100}$$

Для напряжений 100...300 В

$$X_{100} := T_{100} \quad Y_{100} := W_{100}$$

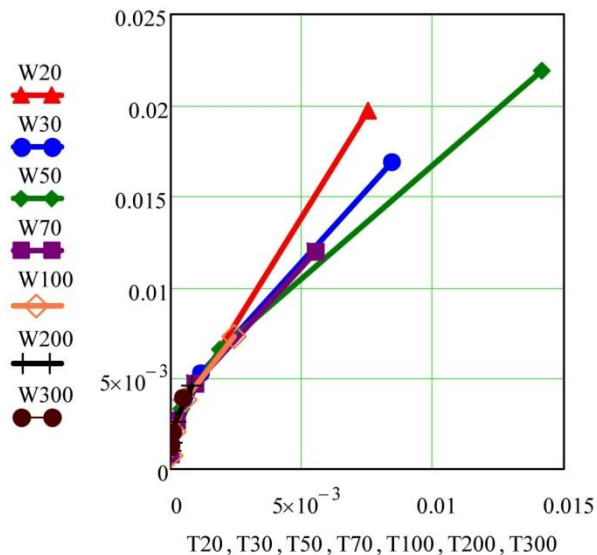
$$X_{200} := T_{200} \quad Y_{200} := W_{200}$$

$$X_{300} := T_{300} \quad Y_{300} := W_{300}$$

$$F_{20_50}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ x \end{pmatrix}$$

$$F_{50_100}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ x \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$F_{100_300}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ 1 \end{pmatrix}$$



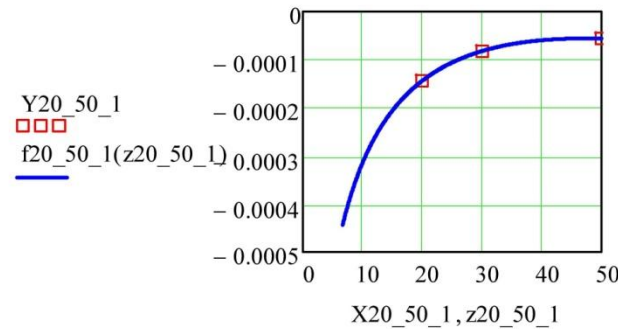
1. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot \sqrt{x} + c$ изменения коэффициента a_{20_50} для напряжений 20...50В:

$$X_{20_50_1} := u_{20_50} \quad Y_{20_50_1} := a_{20_50}$$

$$S_{20_50_1} := \text{linfit}(X_{20_50_1}, Y_{20_50_1}, F_{20_50_1}) \quad F_{20_50_1}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ 1 \end{pmatrix} \quad S_{20_50_1} = \begin{pmatrix} 5.46482 \times 10^{-4} \\ -1.5901 \times 10^{-4} \\ -1.0699 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f_{20_50_1}(x) := F_{20_50_1}(x) \cdot S_{20_50_1} \quad z_{20_50_1} := \frac{\min(X_{20_50_1})}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X_{20_50_1})}{3} .. \max(X_{20_50_1})$$



correlation coefficient

$$\text{corr}(f_{20_50_1}(X_{20_50_1}), Y_{20_50_1}) = 1.00$$

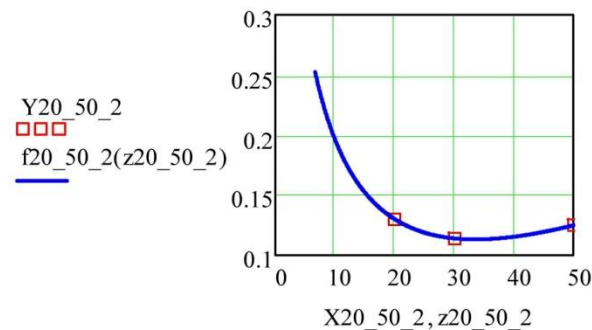
2. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot \sqrt{x} + c$ изменения коэффициента b_{20_50} для напряжений 20...50В:

$$X_{20_50_2} := u_{20_50} \quad Y_{20_50_2} := b_{20_50}$$

$$S_{20_50_2} := \text{linfit}(X_{20_50_2}, Y_{20_50_2}, F_{20_50_2}) \quad F_{20_50_2}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ 1 \end{pmatrix} \quad S_{20_50_2} = \begin{pmatrix} -0.27524 \\ 0.09511 \\ 0.52917 \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f_{20_50_2}(x) := F_{20_50_2}(x) \cdot S_{20_50_2} \quad z_{20_50_2} := \frac{\min(X_{20_50_2})}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X_{20_50_2})}{3} .. \max(X_{20_50_2})$$



correlation coefficient

$$\text{corr}(f_{20_50_2}(X_{20_50_2}), Y_{20_50_2}) = 1.00$$

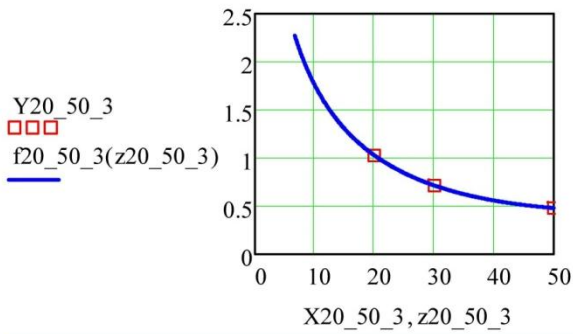
3. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot \sqrt{x} + c$ изменения коэффициента c_{20_50} для напряжений 20...50В:

$$X_{20_50_3} := u_{20_50} \quad Y_{20_50_3} := c_{20_50}$$

$$S_{20_50_3} := \text{linfit}(X_{20_50_3}, Y_{20_50_3}, F_{20_50_3}) \quad F_{20_50_3}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ 1 \end{pmatrix} \quad S_{20_50_3} = \begin{pmatrix} -1.96566 \\ 0.48255 \\ 4.75756 \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f_{20_50_3}(x) := F_{20_50_3}(x) \cdot S_{20_50_3} \quad z_{20_50_3} := \frac{\min(X_{20_50_3})}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X_{20_50_3})}{3} .. \max(X_{20_50_3})$$



correlation coefficient

$$\text{corr}\left(\overrightarrow{f20_50_3(X20_50_3)}, Y20_50_3\right) = 1.00$$

4. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot \sqrt{x} + c$ изменения коэффициента a_{50_100} для напряжений 50...100В:

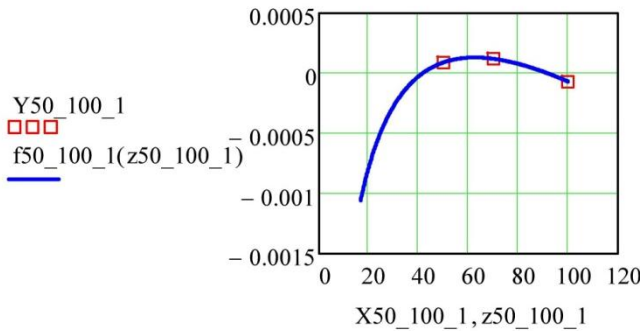
$$X50_100_1 := u50_100 \quad Y50_100_1 := a50_100$$

$$S50_100_1 := \text{linfit}(X50_100_1, Y50_100_1, F50_100_1)$$

$$F50_100_1(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ 1 \end{pmatrix} \quad S50_100_1 = \begin{pmatrix} 3.35309 \times 10^{-3} \\ -8.47823 \times 10^{-4} \\ -7.03139 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f50_100_1(x) := F50_100_1(x) \cdot S50_100_1 \quad z50_100_1 := \frac{\min(X50_100_1)}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X50_100_1)}{3} .. \max(X50_100_1)$$



correlation coefficient

$$\text{corr}\left(\overrightarrow{f50_100_1(X50_100_1)}, Y50_100_1\right) = 1.0$$

5. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot \sqrt{x} + c$ изменения коэффициента b_{50_100} для напряжений 50...100В:

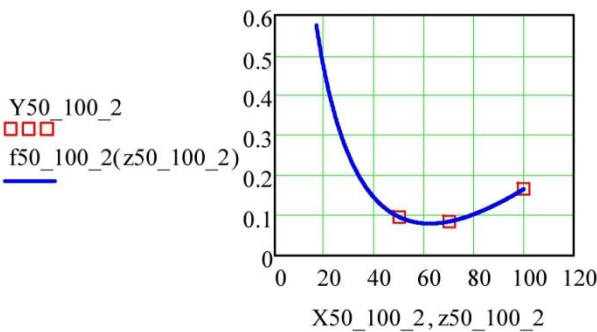
$$X50_100_2 := u50_100 \quad Y50_100_2 := b50_100$$

$$S50_100_2 := \text{linfit}(X50_100_2, Y50_100_2, F50_100_2)$$

$$F50_100_2(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ 1 \end{pmatrix} \quad S50_100_2 = \begin{pmatrix} -1.40448 \\ 0.35628 \\ 3.0711 \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f50_100_2(x) := F50_100_2(x) \cdot S50_100_2 \quad z50_100_2 := \frac{\min(X50_100_2)}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X50_100_2)}{3} .. \max(X50_100_2)$$



correlation coefficient

$$\text{corr}\left(\overrightarrow{f50_100_2(X50_100_2)}, Y50_100_2\right) = 1.0$$

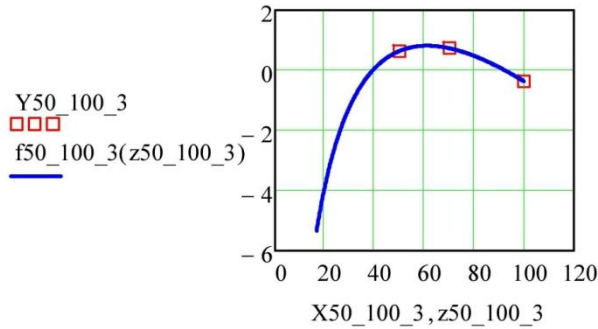
6. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot \sqrt{x} + c$ изменения коэффициента c_{50_100} для напряжений 50...100В:

$$X_{50_100_3} := u_{50_100} \quad Y_{50_100_3} := c_{50_100}$$

$$S_{50_100_3} := \text{linfit}(X_{50_100_3}, Y_{50_100_3}, F_{50_100_3}) \quad F_{50_100_3}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ 1 \end{pmatrix} \quad S_{50_100_3} = \begin{pmatrix} 17.92744 \\ -4.58814 \\ -37.0445 \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f_{50_100_3}(x) := F_{50_100_3}(x) \cdot S_{50_100_3} \quad z_{50_100_3} := \frac{\min(X_{50_100_3})}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X_{50_100_3})}{3} .. \max(X_{50_100_3})$$



correlation coefficient

$$\text{corr}(f_{50_100_3}(X_{50_100_3}), Y_{50_100_3}) = 1.0$$

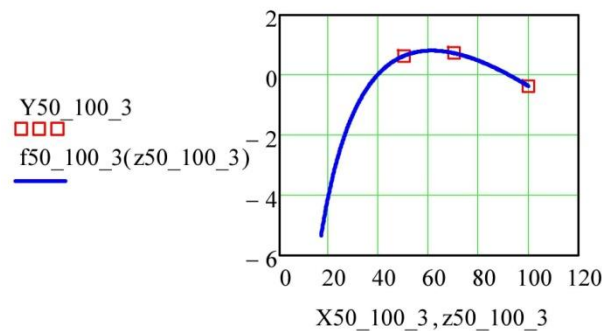
7. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot \sqrt{x} + c$ изменения коэффициента d_{50_100} для напряжений 50...100В:

$$X_{50_100_4} := u_{50_100} \quad Y_{50_100_4} := d_{50_100}$$

$$S_{50_100_4} := \text{linfit}(X_{50_100_4}, Y_{50_100_4}, F_{50_100_4}) \quad F_{50_100_4}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ 1 \end{pmatrix} \quad S_{50_100_4} = \begin{pmatrix} 0.04599 \\ -0.01163 \\ -0.09586 \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f_{50_100_4}(x) := F_{50_100_4}(x) \cdot S_{50_100_4} \quad z_{50_100_4} := \frac{\min(X_{50_100_4})}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X_{50_100_4})}{3} .. \max(X_{50_100_4})$$



correlation coefficient

$$\text{corr}(f_{50_100_4}(X_{50_100_4}), Y_{50_100_4}) = 1.00$$

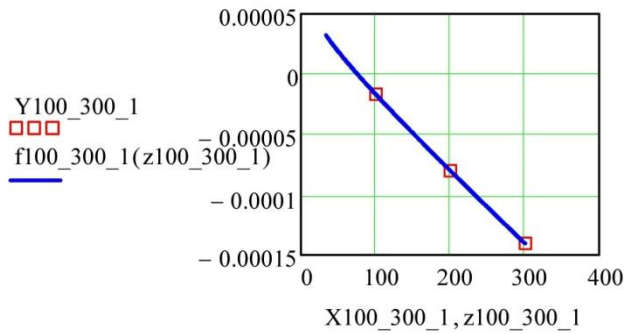
8. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot x + c$ изменения коэффициента a_{100_300} для напряжений 100...300В:

$$X_{100_300_1} := u_{100_300} \quad Y_{100_300_1} := a_{100_300}$$

$$S_{100_300_1} := \text{linfit}(X_{100_300_1}, Y_{100_300_1}, F_{100_300_1}) \quad F_{100_300_1}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ x \\ 1 \end{pmatrix} \quad S_{100_300_1} = \begin{pmatrix} -1.0602 \times 10^{-5} \\ -5.61513 \times 10^{-7} \\ 8.83252 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f_{100_300_1}(x) := F_{100_300_1}(x) \cdot S_{100_300_1} \quad z_{100_300_1} := \frac{\min(X_{100_300_1})}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X_{100_300_1})}{3} .. \max(X_{100_300_1})$$



correlation coefficient

$$\text{corr}(f_{100_300_1}(X_{100_300_1}), Y_{100_300_1}) = 1.0$$

9. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot x + c$ изменения коэффициента b_{100_300} для напряжений 100...300В:

$$X_{100_300_2} := u_{100_300} \quad Y_{100_300_2} := b_{100_300}$$

$$F_{100_300_2}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ x \\ 1 \end{pmatrix}$$

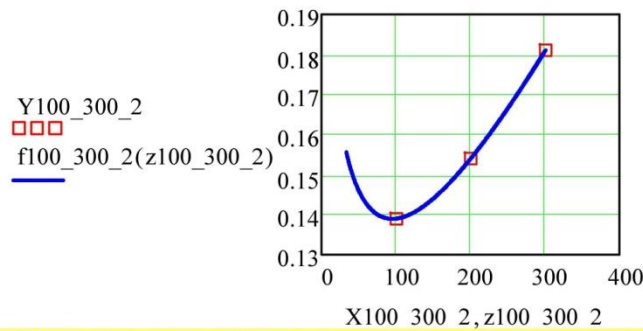
$$S_{100_300_2} := \text{linfit}(X_{100_300_2}, Y_{100_300_2}, F_{100_300_2})$$

$$S_{100_300_2} = \begin{pmatrix} -0.04171 \\ 4.39131 \times 10^{-4} \\ 0.28718 \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f_{100_300_2}(x) := F_{100_300_2}(x) \cdot S_{100_300_2}$$

$$z_{100_300_2} := \frac{\min(X_{100_300_2})}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X_{100_300_2})}{3} .. \max(X_{100_300_2})$$



correlation coefficient

$$\text{corr}(f_{100_300_2}(X_{100_300_2}), Y_{100_300_2}) = 1.0$$

10. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot \ln(x) + b \cdot x + c$ изменения коэффициента c_{100_300} для напряжений 100...300В:

$$X_{100_300_3} := u_{100_300} \quad Y_{100_300_3} := c_{100_300}$$

$$F_{100_300_3}(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ x \\ 1 \end{pmatrix}$$

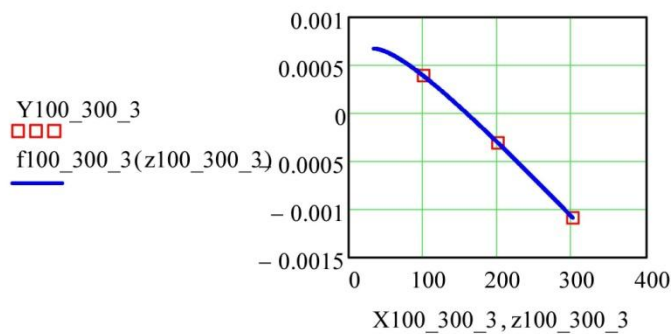
$$S_{100_300_3} := \text{linfit}(X_{100_300_3}, Y_{100_300_3}, F_{100_300_3})$$

$$S_{100_300_3} = \begin{pmatrix} 2.82604 \times 10^{-4} \\ -8.93186 \times 10^{-6} \\ -1.73519 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f_{100_300_3}(x) := F_{100_300_3}(x) \cdot S_{100_300_3}$$

$$z_{100_300_3} := \frac{\min(X_{100_300_3})}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X_{100_300_3})}{3} .. \max(X_{100_300_3})$$



correlation coefficient

$$\text{corr}(f_{100_300_3}(X_{100_300_3}), Y_{100_300_3}) = 1.0$$

Уравнения регрессии и их коэффициентов:

$$E := 54$$

$$a_{20_50}(E) := 5.46482 \times 10^{-4} \cdot \ln(E) - 1.5901 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{E} - 1.0699 \times 10^{-3}$$

$$b_{20_50}(E) := -0.27524 \cdot \ln(E) + 0.09511 \cdot \sqrt{E} + 0.52917$$

$$c_{20_50}(E) := -1.96566 \cdot \ln(E) + 0.48255 \cdot \sqrt{E} + 4.75756$$

$$W_{20_50}(t) := a_{20_50}(E) \cdot \ln(t) + b_{20_50}(E) \cdot \sqrt{t} + c_{20_50}(E) t$$

$$a_{50_100}(E) := 3.35309 \times 10^{-3} \cdot \ln(E) - 8.47823 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{E} - 7.03139 \times 10^{-3}$$

$$b_{50_100}(E) := -1.40448 \cdot \ln(E) + 0.35628 \cdot \sqrt{E} + 3.0711$$

$$c_{50_100}(E) := 17.92744 \cdot \ln(E) - 4.58814 \cdot \sqrt{E} - 37.0445$$

$$d_{50_100}(E) := 0.03506 \cdot \ln(E) - 8.79152 \times 10^{-3} \cdot \sqrt{E} - 0.07319$$

$$W_{50_100}(t) := a_{50_100}(E) \cdot \ln(t) + b_{50_100}(E) \cdot \sqrt{t} + c_{50_100}(E) t + d_{50_100}(E)$$

$$a_{100_300}(E) := -1.0602 \times 10^{-5} \cdot \ln(E) - 5.61513 \times 10^{-7} \cdot E + 8.83252 \times 10^{-5}$$

$$b_{100_300}(E) := -0.04171 \ln(E) + 4.39131 \times 10^{-4} \cdot E + 0.28718$$

$$c_{100_300}(E) := 2.82604 \times 10^{-4} \cdot \ln(E) - 8.93186 \times 10^{-6} \cdot E - 1.73519 \times 10^{-5}$$

$$W_{100_300}(t) := a_{100_300}(E) \cdot \ln(t) + b_{100_300}(E) \cdot \sqrt{t} + c_{100_300}(E)$$

Приложение Г

Определение коэффициентов регрессии зависимости искробезопасного тока от времени срабатывания источника питания, индуктивности и напряжения цепи

ORIGIN := 1

Зависимость коэффициентов a30, a40, a50 от напряжения

Tr := 1

$\tau := 30$

$$a30(Tr) := 267.28191 \cdot Tr^{-0.09175} - 196.93519$$

$$b30(Tr) := 2.64862 \times 10^{-3} \cdot Tr^{1.48842} - 0.49995$$

$$c30(Tr) := -3.42542 \times 10^{-3} \cdot Tr^{1.51275} - 6.99135 \times 10^{-3}$$

$$I(\tau) := a30(Tr) \cdot \tau^{b30(Tr)} + c30(Tr)$$

1.1. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot x^b + c$ изменения коэффициента a для a30, a40, a50

$$a1 := \begin{pmatrix} 267.28191 \\ 265.73618 \\ 223.4315 \end{pmatrix} \quad b1 := \begin{pmatrix} -0.09175 \\ -0.09761 \\ -0.12422 \end{pmatrix} \quad c1 := \begin{pmatrix} -196.93519 \\ -195.59102 \\ -153.44547 \end{pmatrix} \quad U1 := \begin{pmatrix} 30 \\ 40 \\ 50 \end{pmatrix}$$

$$X1_1 := U1$$

$$Y1_1 := a1$$

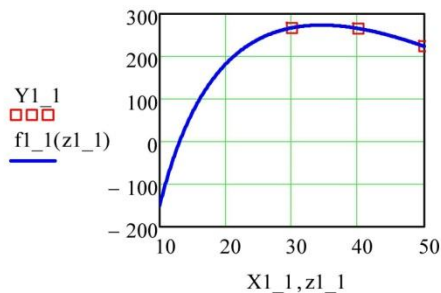
$$F1_1(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ \sqrt{x} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$S1_1 := \text{linfit}(X1_1, Y1_1, F1_1)$$

$$S1_1 = \begin{pmatrix} 1.35083 \times 10^3 \\ -460.4523 \\ -1.80515 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f1_1(x) := F1_1(x) \cdot S1_1 \quad z1_1 := \frac{\min(X1_1)}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X1_1)}{3} .. \max(X1_1)$$



correlation coefficient

$$\text{corr}(f1_1(X1_1), Y1_1) = 1.00$$

$$a40(Tr) := 265.73618 \cdot Tr^{-0.09761} - 195.59102$$

$$b40(Tr) := 3.96792 \times 10^{-3} \cdot Tr^{1.45217} - 0.50081$$

$$c40(Tr) := -3.61781 \times 10^{-3} \cdot Tr^{1.65119} - 0.01211$$

$$I(\tau) := a40(Tr) \cdot \tau^{b40(Tr)} + c40(Tr)$$

1.2. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot x^b + c$ изменения коэффициента b для a30, a40, a50

$$X1_2 := U1$$

$$Y1_2 := b1$$

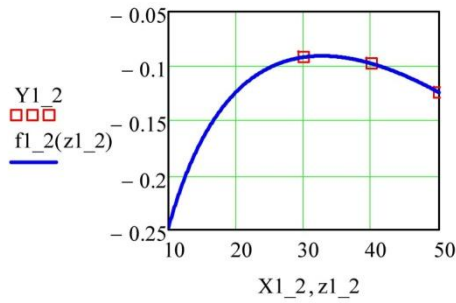
$$S1_2 := \text{linfit}(X1_2, Y1_2, F1_2)$$

$$F1_2(x) := \begin{pmatrix} \ln(x) \\ x \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$S1_2 = \begin{pmatrix} 0.32151 \\ -9.83536 \times 10^{-3} \\ -0.89022 \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f1_2(x) := F1_2(x) \cdot S1_2 \quad z1_2 := \frac{\min(X1_2)}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X1_2)}{3} .. \max(X1_2)$$



correlation coefficient

$$\text{corr}(\overrightarrow{f1_2(X1_2)}, Y1_2) = 1.00$$

$$a50(Tp) := 223.4315 \cdot Tp^{-0.12422} - 153.44547$$

$$b50(Tp) := 5.59719 \times 10^{-3} \cdot Tp^{1.40969} - 0.5022$$

$$c50(Tp) := -3.26794 \times 10^{-3} \cdot Tp^{1.82551} - 0.01985$$

$$I(\tau) := a50(Tp) \cdot \tau^{b50(Tp)} + c50(Tp)$$

1.3. Нахождение коэффициентов аппроксимирующей функции модели: $y = a \cdot x^b + c$

изменения коэффициента с для a30, a40, a50

$$X1_3 := U1$$

$$Y1_3 := c1$$

$$S1_3 := \text{linfit}(X1_3, Y1_3, F1_3)$$

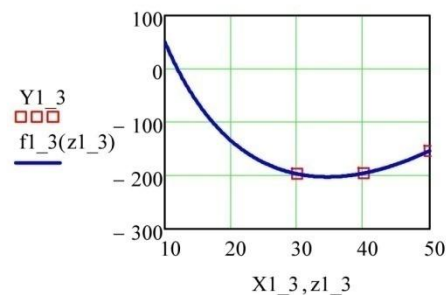
$$F1_3(x) := \begin{pmatrix} \sqrt{x} \\ x \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$S1_3 = \begin{pmatrix} -404.70632 \\ 34.42639 \\ 986.941 \end{pmatrix}$$

Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$f1_3(x) := F1_3(x) \cdot S1_3$$

$$z1_3 := \frac{\min(X1_3)}{3}, 1.01 \cdot \frac{\min(X1_3)}{3} .. \max(X1_3)$$



correlation coefficient

$$\text{corr}(\overrightarrow{f1_3(X1_3)}, Y1_3) = 1.00$$

Уравнения регрессии и его коэффициентов 30-50V:

$$a1(U) := 1.35083 \times 10^3 \cdot \ln(U) - 460.4523 \cdot \sqrt{U} - 1.80515 \times 10^3$$

$$b1(U) := 0.32151 \cdot \ln(U) - 9.83536 \times 10^{-3} \cdot U - 0.89022$$

$$c1(U) := -404.70632 \cdot \sqrt{U} + 34.42639 \cdot U + 986.941$$

$$a2(U) := 0.0117 \cdot \ln(U) - 0.01057 \cdot \sqrt{U} + 6.90619 \times 10^{-4} \cdot U$$

$$b2(U) := 0.06179 \cdot \sqrt{U} - 8.86107 \times 10^{-3} \cdot U + 1.41579$$

$$c2(U) := 0.02086 \cdot \ln(U) - 8.09804 \times 10^{-3} \cdot \sqrt{U} - 0.52655$$

$$a3(U) := -0.01714 \cdot \ln(U) + 5.59074 \times 10^{-3} \cdot \sqrt{U} + 0.02423$$

$$b3(U) := -0.35589 \cdot \sqrt{U} + 0.044 \cdot U + 2.14206$$

$$c3(U) := 0.10658 \cdot \ln(U) - 0.04223 \cdot \sqrt{U} - 0.13821$$

$$I(L) := a30_50(Tp) \cdot L^{b30_50(Tp)} + c30_50(Tp)$$

$$a30_50(Tp) := a1(U) \cdot Tp^{b1(U)} + c1(U)$$

$$b30_50(Tp) := a2(U) \cdot Tp^{b2(U)} + c2(U)$$

$$c30_50(Tp) := a3(U) \cdot Tp^{b3(U)} + c3(U)$$

Приложение Д

Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной
работы

ЧАСТНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
„НАУЧНО - ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
„МАКЕЕВСКИЙ ЗАВОД
ШАХТНОЙ АВТОМАТИКИ”

86115, г. Макеевка, ул. Кипренского, 1
идентификационный номер 00165675
тел. факс (0623) 22-72-75

27.11.2019г. № 01/27-11/2019

на № 14/2177 от 26.11.2019г.

Гладкову А. Ю.
28.11.19г.

Директору
СА
Ташкин РА

Директору
ГУ МакНИИ
Брюханову А. М.

86108, г. Макеевка, Донецкой обл.,
ул. ул. Лихачева, 60

Об использовании материалов
диссертационной работы

27.11.19

Сообщаем, что научные положения и результаты, изложенные в диссертационной работе Гладкова А. Ю. «Обоснование параметров искробезопасного источника для освещения выработок длиной до 300 м», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, реализованы в комплексе устройств освещения шахтного типа КУОШ.

Приведенная в диссертационной работе базовая схема искробезопасного источника питания повышенной мощности с опережающей защитой использована при разработке блока питания КУОШ.200.

Значения предельных параметров нагрузки (индуктивность, емкость), полученные методами расчетной компьютерной оценки искробезопасности источников питания с опережающей защитой являются основой схемотехнических решений при разработке светильников КУОШ.100, КУОШ.100-01.

Оптимизации технических характеристик систем шахтного освещения с учетом их предельных параметров искробезопасности, выполненная в диссертационной работе, применена при разработке технических требований к комплексу устройств освещения шахтного КУОШ. Это позволило уточнить расчетным методом оптимальное количество светильников, сечение кабеля, напряжение холостого хода и номинальную мощность источника, а также учесть падение напряжения в кабельной линии на каждом светильнике и т.д.

В целом результаты диссертационной работы использованы при разработке конструкторской документации на комплекс устройств освещения шахтного КУОШ.

Искробезопасные параметры комплекса устройств освещения шахтного КУОШ кабельной линией не менее 300 м подтверждены испытаниями (Протокол №9729-И от 12.11.2019).

СОГЛАСНО
Ученый секретарь
диссертационного совета
И.А. Бер...



КАНЦЕЛАРИЯ
Дата 27.11.2019
ИЛ. № 2143 от 1

Гурманкин ИГ

Гладков А. Ю.
02.12.18. *Довгань*



ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ
ГОРНЫХ МАШИН «АВТОМАТГОРМАШ ИМЕНИ В.А. АНТИПОВА»
(ГУ «АВТОМАТГОРМАШ ИМ. В.А. АНТИПОВА»)
пр. Ильича, 93, г. Донецк, 283003, Тел. (071) 331-09-14
E-mail: avtomatgormash@mail.ru, Код ЕГРПОУ 30556266

№ 7452 от 28.11.2019

Демченко ОА
Герасимо ИП

Директору ГУ «МакНИИ»

188
02.12.19

А.М. Брюханову

О применении методики

29.11.19

Уважаемый Александр Михайлович!

Методика «Расчетная оценка искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока рудничного электрооборудования», разработанная аспирантом Гладковым А. Ю., содержит положения, позволяющие производить предварительную оценку искробезопасности электрических цепей на начальной стадии проектирования схмотехнических решений без изготовления макетов и тем более готовых изделий, что способствует экономии средств и ускорению выполнения разработки.

Данная методика обладает высокой информативностью и широкими возможностями для оценки электрических цепей. Реализация основных положений методики осуществляется с помощью моделирования в пакете MicroCap процесса разряда и доступна для использования каждым сотрудником.

Рассматриваемая методика применяется в нашем институте и имеет положительный результат

И.о. директора

А.Ю. Довгань

Исполнитель Курнос В.Г
(071) 321-44-31

МЕДИИ
КАНЦЕЛЯРИЯ
Дата 29.11.2019
№ 2157 № 1

СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.

И.А. Бершадский



Гладков В. Ю.
02.12.19



ГУ "НИИВЗ"

Государственное учреждение
"Научно-исследовательский,
проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного
и рудничного электрооборудования"

ДНР
83052 г. Донецк
ул. 50-й Гвардейской дивизии, 17

ИКОП - 00217159
Аналоговый счет - 40106810631017022083
Центральный Республиканский Банк
Донецкой Народной Республики
Отделение № 0001/73
БИК Банка - 310101001

Тел.: (062) 382-93-53
Факс: (062) 382-93-52
Моб.: (071) 326-83-66
e-mail: niivz@list.ru

№ 1/365 от 28.11.2019,
на Ваш 14/2193 от 28.11.2019,
О применении методики «Расчетная
оценка искробезопасности ...»

*Фемченко С.А.
Гороско И.П.*
86108, 19
29.11.19

Директору
ГУ «МакНИИ»
Брюханову А. М.
Макеевка, Донецкой обл.,
ул. Лихачева, 60

187
02.12.19

Сообщаем Вам, что методика «Расчетная оценка искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока рудничного электрооборудования» на основе компьютерных моделей разрядов применяется в нашем Испытательном центре при:

- предварительной оценке искробезопасности электрических цепей и выборе наиболее опасных испытательных режимов с использованием искробразующего механизма;
- определении граничных электрических искробезопасных параметров оцениваемой цепи (максимальное выходное напряжение U_0 , максимальный выходной ток I_0 , максимальная внешняя емкость C_0 , максимальная внешняя индуктивность L_0);
- предварительной оценке искробезопасности такого оборудования, как барьеры искрозащиты или блоки питания с нелинейной вольтамперной характеристикой (построенных на управляемых полупроводниковых компонентах), а также схем с «опережающей защитой» (отключаемые при коммутации).

Директор



Е.А.Вареник



СОГЛАСНО ОРИГ.
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.001.01
И.А. Бершадский



Горашко И. П.
Гладкову А. Ю.
04.12.19. Демченко



ГУ «ДОНУГЛЕМАШ»

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ДОНЕЦКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ, ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ МЕХАНИЗАЦИИ ШАХТ»
(ГУ «ДОНУГЛЕМАШ»)

ДНР 283048, г. Донецк, Киевский район, ул. Университетская, 53а
E-mail: donuglemash@mail.ru

04.12.2019 № 07-419

на № 14/2191

от 28.11.2019г

Заместителю директора
по научной работе ГУ «МакНИИ»
Демченко О.А.
86108, г. Макеевка, Донецкой обл.,
ул. Лихачева, 60

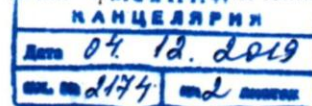
191
04.12.19

О применении методики

Уважаемый Олег Александрович!

В части подтверждения применения в нашем институте методики «Расчетная оценка искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока рудничного электрооборудования», сообщаяю, что данная методика позволяет:

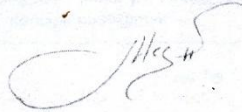
- производить предварительную оценку искробезопасности сложных электрических цепей, которые представляют собой совокупность последовательно - параллельных соединений, состоящих как из линейных элементов (резисторов, конденсаторов, дросселей), так и нелинейных (управляемых полупроводниковых элементов, например, транзисторов, тиристоров и т. д.);
- реализовать оценку искробезопасности электрических цепей без дорогостоящего специального оборудования (взрывные камеры, газо-воздушные смеси и т.д.), что способствует значительной экономии времени и средств, выделенных на разработку аппаратуры;
- получить в результате, для исследуемой цепи, не только качественную (возможность/невозможность воспламенения потенциально взрывоопасной атмосферы от искрения), но и количественную оценку искробезопасных электрических цепей (величина запаса до граничных значений), что дает возможность, в процессе проектирования, выбирать оптимальные, с точки зрения обеспечения



взрывобезопасности, параметры разрабатываемого электрооборудования.

В связи с вышеизложенным, методика «Расчетная оценка искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока рудничного электрооборудования» актуальна и необходима для оценки электрических цепей электрооборудования горных машин, создаваемых институтом.

Заместитель директора
по научной работе



А.В.Мезников

ИЗДАНИЕ
№ 11 11 2011
11 11 2011



ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»
МакННИИ



ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
РСА.ИЛ.0008

ул. Лихачева, 60, Горняцкий район, г. Макеевка, 86132, ДНР
Телефон: (0623) 22-22-18; факс (0623) 22-19-00
e-mail: maknii2014@inbox.ru
http://maknii.jimdo.com

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель
испытательного центра

И. П. Горошко
(Ф.И.О)

(подпись)

«12» ноября 2019 г.



ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 9729-И

Комплекс устройств освещения шахтный типа КУОШ
(наименование продукции, тип)



СОГЛАСНО ОРДИНАТУ

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.001.01

И.А. Бершадский



ИЦ МакНИИ

Протокол испытаний № 9729-И

Заказчик испытаний: ЧАО НПП «МАКЕЕВСКИЙ ЗАВОД ШАХТНОЙ АВТОМАТИКИ»,
86115, ДНР, г. Макеевка, ул. Кипренского, 1
 (наименование организации, адрес)

Испытания проводились на основании: государственный регистрационный номер работы
0118D000086 «Провести исследования и разработать
технические требования к устройству защиты от
короткого замыкания нового поколения»
 (наименование документа, дата)

1 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЯ

1.1 Наименование, тип продукции, зав. № комплекс устройств освещения типа КУОШ,
 зав. № 1, год изготовления - 2018, ТЗ Комплекс устройств освещения шахтный КУОШ
 (указывается наименование и обозначение НД, в соответствии с которым изготовлена продукция)

1.2 Изготовитель: ЧАО НПП «МАКЕЕВСКИЙ ЗАВОД ШАХТНОЙ АВТОМАТИКИ»;
86115, ДНР, г. Макеевка, ул. Кипренского, 1
 (наименование организации, адрес)

1.3 Назначение продукции:

Комплекс устройств освещения шахтный типа КУОШ предназначен для освещения искробезопасными светодиодными светильниками рабочей зоны очистного забоя, оснащенного механизированной крепью (протяженностью не более 300 м) и энергопоезда очистного забоя, расположенного в штреке.

Область применения - подземные выработки угольных шахт, в том числе опасных по газу и/или угольной пыли, согласно НПАОТ 10.0-1.01-16 «Правила безопасности в угольных шахтах».

Уровень и виды взрывозащиты: блок питания – РВ ЗВИа, светильники – РО Ia.

1.4 Документация, предоставленная для испытаний:

Комплекс устройств освещения шахтный КУОШ. Техническое задание.

КУОШ.000 РЭ. Комплекс устройств освещения шахтный КУОШ. Руководство по эксплуатации.

КУОШ.000 ФО. Комплекс устройств освещения шахтный КУОШ. Формуляр.

Комплект конструкторской документации (таблица 1.1).

Таблица 1.1

№ п/п	Наименование чертежа	Шифр
1	2	3
1	Блок питания. Сборочный чертеж	КУОШ.200 СБ
2	Блок питания. Перечень элементов	КУОШ.200 ПЭЗ
3	Блок питания. Схема электрическая принципиальная	КУОШ.200 ЭЗ
4	Блок питания. Схема электрическая соединений	КУОШ.200 Э4
5	Блок питания. Чертеж средств взрывозащиты	КУОШ.200 Д
6	Блок трансформатора. Сборочный чертеж	КУОШ.400 СБ
7	Блок трансформатора. Схема электрическая соединений	КУОШ.400 Э4
8	Блок выемной. Сборочный чертеж	КУОШ.500 СБ
9	Блок выемной. Схема электрическая соединений	КУОШ.500 Э4
10	Блок БИЗ. Сборочный чертеж	КУОШ.530 СБ



Окончание таблицы 1.1

1	2	3
11	Блок БИЗ. Перечень элементов	КУОШ.530 ПЭЗ
12	Блок БИЗ. Схема электрическая принципиальная	КУОШ.530 ЭЗ
13	Блок БИЗ. Схема электрическая соединений	КУОШ.530 Э4
14	Плата БИЗ. Сборочный чертеж	КУОШ.550 СБ
15	Плата печатная	КУОШ.551
16	Светильник. Сборочный чертеж	КУОШ.100 СБ
17	Светильник. Перечень элементов	КУОШ.100 ПЭЗ
18	Светильник. Схема электрическая принципиальная	КУОШ.100 ЭЗ
19	Блок выемной. Сборочный чертеж	КУОШ.130 СБ
20	Блок электронный. Сборочный чертеж	КУОШ.140 СБ
21	Плата. Сборочный чертеж	КУОШ.180 СБ
22	Плата печатная	КУОШ.181
23	Плата. Сборочный чертеж	КУОШ.190 СБ
24	Плата печатная	КУОШ.191

2 ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Контрольные испытания

(сертификационные, квалификационные, типовые, опытные испытания и др. в соответствии с ГОСТ 16504)

3 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБРАЗЦОВ ПРОДУКЦИИ

3.1 Образцы продукции предоставлены в центр: -

(наименование организации, предоставившей образцы)

3.2 Отбор и идентификацию образца продукции осуществляли:

(должности и Ф.И.О лиц, которые осуществляли отбор и идентификацию образцов продукции)

(номера и даты актов отбора и идентификации образцов продукции)

в соответствии с ГОСТ 31814-2012. Оценка соответствия. Общие правила отбора образцов для испытаний продукции при подтверждении соответствия

(наименование нормативных и/или других документов, содержащих план отбора образцов)

4 МЕСТО И ДАТА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания проводились на испытательной площадке № 1 лаборатории искробезопасности с 09.11.2019 г. по 11.11.2019 г.

5 КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ

Климатические условия окружающей среды при проведении испытаний приведены в табл.5.1.

Таблица 5.1

ФСМК-5.10/01 (ред. 01.02.18)

Лист 3 из 7



Дата проведения испытаний	Время измерения климатических условий	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Барометрическое давление, кПа
09.11.2019	8.30	+ 20	62	99,5
10.11.2019	8.30	+ 20	65	99,2
11.11.2019	8.30	+ 20	63	100,3

6 МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Процедура испытаний установлена:

п. 2.8 ГОСТ 22782.5 «Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытаний»

(наименование нормативных и/или других документов, устанавливающих процедуру испытаний)

7 ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ (в т.ч. газовые смеси, стандартные образцы)

Испытательное оборудование, используемое при проведении испытаний, приведено в табл.7.1.

Таблица 7.1

Наименование	Тип	Заводской (инвентарный) номер	Диапазон измерений	Точность (класс, погрешность, неопределенность измерения)	Дата очередной поверки/ аттестации
Барометр-анероид	БАММ -1	754 (123199)	от 80 до 106 кПа	погрешность ±0,2 кПа	15.05.2020
Гигрометр психрометрический	ВИТ - 1	в171	0÷25 °С 20÷90%	погрешность ±0,2°С ±6%	28.09.2020
Мультиметр цифровой	APPA-109N	13651180 (126394)	2 В÷20 В DC 20 мА÷200 мА DC 200 мА÷2 А DC 2 А÷10 А DC	погрешность ± 0,11 % ± 0,4 % ± 0,4 % ± 0,6 %	23.10.2020
Установка для испытаний искробезопасных электрических цепей с искрообразующим механизмом I типа	"Искра-1У5"	4 (104622)	0÷2 А 0÷1 Гн 0÷1000 В	-	11.10.2020

8 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты испытаний приведены в табл.8.1.

При испытаниях во взрывной камере использовалась контрольная водородно-воздушная смесь с объемным содержанием водорода (47±2) % (обеспечивает коэффициент искробезопасности 1,5 в соответствии с пп. 1.1.2, 2.8.9 ГОСТ 22782.5).



Таблица 8.1

№ п/п	Описание испытательного режима	Параметры испытательной цепи		Количество искрений, шт.	Наличие воспламенения смеси вследствие коммутации испытуемой цепи	Наличие воспламенения смеси вследствие коммутации контрольной цепи	Вывод о соответствии
		Значение напряжения, В	Значение тока, мА				
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Взрывная камера (ВК) включена параллельно выходу источника питания. Ток уставки 4,98 А	36	150 Сраб. защита	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
2	ВК включена последовательно с резистором 22 Ом, формирующим 1/3 тока уставки	36	1630	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
3	ВК включена последовательно с резистором 15 Ом, формирующим 1/2 тока уставки	36	2400	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
4	ВК включена последовательно с резистором 7,5 Ом, формирующим ток уставки	36	4800	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
5	ВК включена параллельно с конденсатором $C=2,2$ мкФ	36	150 Сраб. защита	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
6	ВК включена параллельно с конденсатором $C=2,6$ мкФ	36	150 Сраб. защита	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
7	ВК включена параллельно с конденсатором $C=2,9$ мкФ	36	150 Сраб. защита	4000 4000 4000 4000	Есть Есть Есть Есть	- - - -	Не соответствует
8	ВК включена последовательно с резистором 7,5 Ом и дросселем $L=330$ мкГн	36	4800	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
9	ВК включена последовательно с резистором 7,5 Ом и дросселем $L=420$ мкГн	36	4800	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
10	ВК включена последовательно с резистором 7,5 Ом и дросселем $L=450$ мкГн	36	4800	4000 4000 4000 4000	Есть Есть Есть Есть	- - - -	Не соответствует



Продолжение таблицы 8.1

1	2	3	4	5	6	7	8
11	ВК включена последовательно в начале кабельной линии, сечением 7,5мм ² (3x2,5мм ²) и длиной 540 м. В конце кабельной линии подключен резистор 7,5 Ом	36	4800	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
12	ВК включена последовательно в конце кабельной линии, сечением 7,5мм ² (3x2,5мм ²) и длиной 540 м последовательно с резистором 7,5 Ом	36	4800	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
13	ВК включена в начале кабельной линии, сечением 7,5мм ² (3x2,5мм ²) и длиной 400 м. После 260 м через каждые 10 м подключены параллельно 16 светильников	36	4100	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
14	Тоже, что режим 13, но ВК в конце линии	36	4100	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
15	ВК включена в начале кабельной линии, сечением 7,5мм ² (3x2,5мм ²) и длиной 160 м (через каждые 10 м подключены параллельно 16 светильников)	36	4100	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
16	Тоже, что режим 15, но ВК в конце линии	36	4100	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует
17	ВК включена последовательно с 17 светильниками, подключенными параллельно к источнику питания	36	4250	4000 4000 4000 4000	Нет Нет Нет Нет	Есть Есть Есть Есть	Соответствует

9 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

9.1 Протокол является целостным документом и не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения испытательного центра.

9.2 Копии протокола действительны только после их заверения испытательным центром.



ИЦ МакНИИ

Протокол испытаний № 9729-И

9.3 Результаты испытаний относятся только к испытанным образцам.

9.4 Протокол испытаний действителен в течение 1 года с момента утверждения.

Ответственные исполнители:

Старший лаборант

(должность)

12.11.19

(дата)

(подпись)

П. Н. Самородов

(инициалы и фамилия)

Перенос данных проверил

Инженер II категории

(должность)

12.11.19

(дата)

(подпись)

Е. В. Бойко

(инициалы и фамилия)