

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

*На правах рукописи*



**Гладков Александр Юрьевич**

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

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Макеевка - 2021

**Работа выполнена** в ГУ «МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ» Государственного комитета по науке и технологиям Донецкой Народной Республики, г. Макеевка

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент,  
**Бершадский Илья Адольфович**  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,  
профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов»

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, академик АГН  
**Шатило Алексей Николаевич**  
ООО «ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ СРЕД ЛАБ-ЕХ» (г. Раменское, Московская обл., РФ),  
эксперт по сертификации взрывозащищенного и рудничного оборудования

кандидат технических наук,  
**Золотарев Евгений Владимирович**  
ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования» (ГБУ «НИИВЭ») ( г. Донецк),  
Заведующий лабораторией исследований и автоматизированных испытаний трансформаторов и трансформаторных подстанций комплексного научно-исследовательского отдела трансформаторов и трансформаторных подстанций

**Ведущая организация:** ГУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин» «Автоматгормаш имени В.А. Антипова» (г. Донецк).

Защита состоится «10 » февраля 2022 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 01.008.01в ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: [uchensovet@donntu.org](mailto:uchensovet@donntu.org).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета Д 01.008.01  
доктор технических наук



И.А. Бершадский

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**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-технической задачей 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 газоздушную взрывоопасную смесь и прогнозирование уровня опасности электрического искрения цепей искробезопасного освещения в очистных выработках.

#### **Научная новизна полученных результатов**

1. Впервые получена зависимость изменения сопротивления и тепловой постоянной инерции дугового разряда  $\tau$  в индуктивно-резистивных цепях, отличающаяся тем, что в ней учитываются мгновенные значения средней мощности разряда и статическая вольтамперная характеристика дуги, кроме того, показано, что  $\tau$  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 и практическая 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 схемотехнических 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-ёмкостных 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 ёмкостных цепей от напряжения и длительности разряда, являющиеся основой расчётного 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 объём 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.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, представлены цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** «Анализ состояния искробезопасных систем освещения» представлен анализ способов обеспечения взрывобезопасности системы, характеристик искробезопасных источников систем освещения, а также современных методов оценки их искробезопасности.

Результаты анализа показали, что существующее шахтное стационарное осветительное оборудование ограничено в применении за счет недостаточного уровня взрывозащиты и значительных габаритных показателей, а также не обеспечивает безопасность при эксплуатации в передвижных комплексах очистных и подготовительных выработок по нормам защиты от поражения людей электрическим током.

Вид взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь «i»» в электрических устройствах освещения полностью устраняет указанные недостатки. Выявлено, что на сегодняшний день в ДНР, РФ и странах Европы не разработаны искробезопасные источники питания повышенной мощности, подходящие по параметрам для систем освещения протяженных выработок.

Существующие экспериментальные и расчётные методы не обладают приемлемой для практики точностью или ограничены в применении к данным источникам питания. Это приводит к занижению нормируемого значения коэффициента запаса.

Низкая достоверность расчётных методов обусловлена недостаточной изученностью процессов выделения энергии электрической цепью в разряд, возникающий при её коммутации, а также условий поджигания им взрывчатой смеси. Последнее сводится к отсутствию аналитического выражения минимальной воспламеняющей энергии, выделяемой в разряд при замыкании индуктивно-ёмкостных цепей от длительности разряда и напряжения цепи, а также допустимого искробезопасного тока источников питания с динамической защитой и индуктивно-резистивной нагрузкой от напряжения цепи, её индуктивности и времени срабатывания источника.

**Во втором разделе** «Разработка метода расчётной компьютерной оценки искробезопасности разрядов, возникающих при замыкании электрических цепей источников питания с динамической защитой» были получены экспериментально основные параметры разряда замыкания (постоянная времени установления напряжения, установившееся значение напряжения), на их основе разработана усовершенствованная математическая модель разряда, возникающего в ёмкостной цепи, определены аналитические уравнения для расчёта минимальной воспламеняющей энергии, предложен усовершенствованный расчётный метод оценки искробезопасности сложных ёмкостных (индуктивно-ёмкостных) цепей.

Экспериментальные исследования разрядов замыкания ёмкостных цепей позволили установить следующее. Напряжение дуги остается практически неизменным за время существования разряда, а его величина и время установления определяется материалом контактирующих пар и не зависят от начального напряжения на конденсаторе. Выявлено, 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 (доверительная вероятность 0,95). Независимо от напряжения цепи, в 1,2 раза больше энергии выделяется в разряд при положительной полярности на вольфрамовой проволоке, которая должна учитываться в компьютерной модели разряда.

Получены экспериментальные зависимости напряжения на разряде  $U_p$  от времени в омической цепи ( $R=3,8$  Ом) при напряжениях цепи от 30В до 70 В. Массив усредненных

напряжений на разряде  $U_p(t)$  всей выборки аппроксимирован с помощью экспоненциальной регрессии вида:

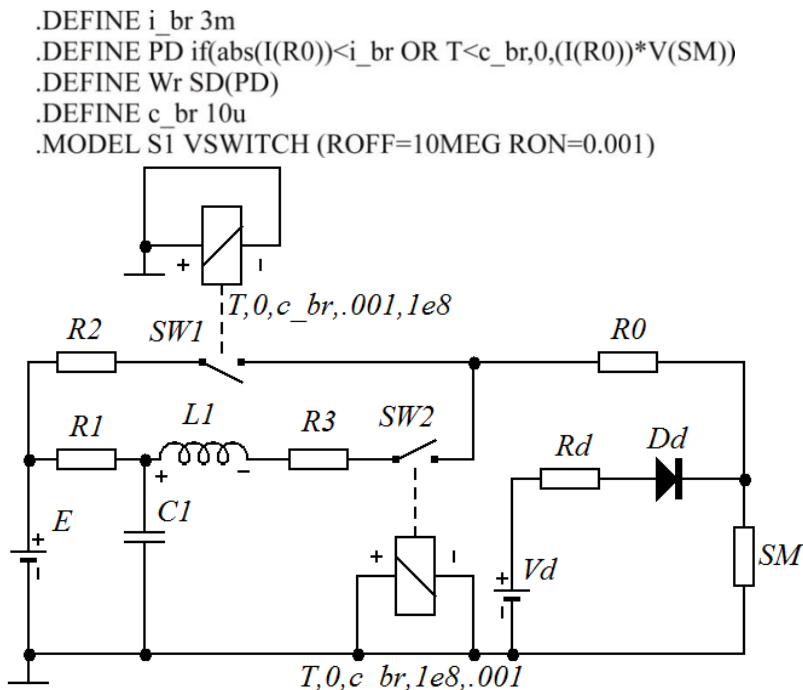
$$U_p(t) = ae^{bt} + c \quad (1)$$

Найдены коэффициенты аппроксимации:  $a=21$  В;  $b= -34$  мкс;  $c=9$  В и оценен коэффициент корреляции  $R=0,97$ .

Представить искрообразующий механизм в виде математической модели в пакете MicroCAP-12 (рисунок 1), отражающей процесс разряда ёмкостной цепи удобно через сопротивление разряда:

$$R_p(t) = \frac{U_p(t)}{I_p(t)} = \frac{(E-U_0)e^{-t/\tau} + U_0}{I_p(t)} = \frac{(E-9)e^{-t \cdot 10^9/29} + 9}{I_p(t)} \quad (2)$$

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,  $U_0$  – значение установившегося напряжения разряда, В,  $\tau$  – постоянная времени 29 нс.



Ключ SW2 обеспечивает запуск переходных процессов разряда в заданный момент времени  $c_{br}$ . Цепочка  $Vd=3$  В,  $Rd=10$  Ом,  $Dd$  моделирует автоэлектронную эмиссию разряда. Резисторы  $R1$ ,  $R2$  исключают влияние источника  $E$  на параметры разряда (применяются для простой цепи). Резистор  $R0$  определяет активное сопротивление проводов, выводов элементов. Модель  $SM$  отражает изменение во времени сопротивления разрядного промежутка (2) и зависит от параметров разрядного контура.

$SM: if(T < c_{br}, 1e8, ((V(E)-9) * exp(-1/29 * 1e9 * (T - c_{br})) + 9) / (I(R0)))$

Рисунок 1— Схема компьютерной модели расчёта параметров разряда искробезопасной индуктивно-ёмкостной цепи

Исследуемая индуктивно-ёмкостная цепь -  $C1$ ,  $R3$ ,  $L1$ .

Сопоставление расчётных и экспериментальных значений энергии разряда  $W_p$ , продолжительности разряда  $T_p$  и максимального тока разряда  $I_{max}$  показывает, что погрешность результатов моделирования по отношению к экспериментальным данным, составляет не более 5%. Согласно графикам зависимостей минимального воспламеняющего напряжения от ёмкости цепи для группы I (IEC 60079-11:2011) определены значения параметров электрической цепи: сопротивления токоограничительного резистора  $R$ , Ом и ёмкости  $C$ , мкФ при напряжениях цепи  $E=20$  В, 30 В, 50 В, 70 В, 100 В, 200 В, 300 В.

С помощью модели рассчитаны значения энергии разряда  $W_b$  и его продолжительности  $T_p$  для указанных ёмкостных цепей (рисунок 2). Найдены аналитические зависимости  $W_b(T_p)$  и их коэффициенты путем аппроксимации с помощью наиболее подходящих регрессионных уравнений (таблица 1), оценен коэффициент корреляции  $R=1$ .



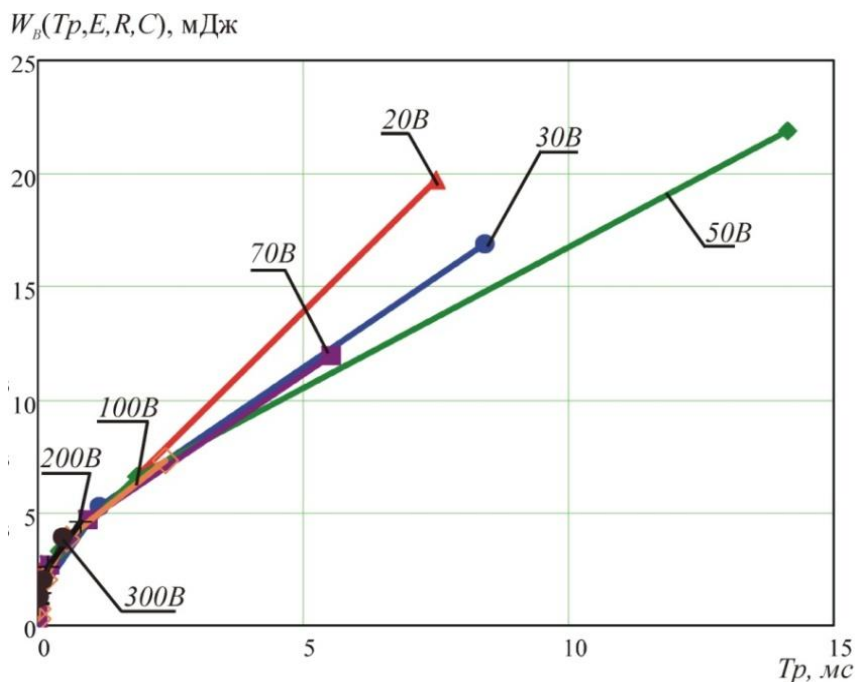


Рисунок 2—Зависимость минимальной воспламеняющей энергии от времени разряда

Таблица 1 — Уравнения минимальной воспламеняющей энергии  $W_B$  (мДж) группы I и их коэффициентов в зависимости от напряжения цепи  $E$ , В и продолжительности разряда  $T_p$  (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	$a_{100\_300}(E) = -1.06 \cdot 10^{-5} \cdot \ln(E) - 5.62 \cdot 10^{-7} \cdot E + 8.83 \cdot 10^{-5}$
	$b_{100\_300}(E) = -0.042 \cdot \ln(E) + 4.39 \cdot 10^{-4} \cdot E + 0.29$
	$c_{100\_300}(E) = 2.83 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(E) - 8.93 \cdot 10^{-6} \cdot E - 1.74 \cdot 10^{-5}$
	$W_B(T_p, E) = a_{100\_300}(E) \cdot \ln(T_p) + b_{100\_300}(E) \cdot \sqrt{T_p} + c_{100\_300}(E)$

Получил дальнейшее развитие метод расчётной оценки искробезопасности сложных индуктивно-ёмкостных цепей. Суть метода заключается в сравнении расчётной энергии разряда  $W_p(T_p)$ , полученной путем моделирования исследуемой цепи с минимальной воспламеняющей

энергией  $W_B(T_p, E)$ , рассчитанной по уравнениям (таблица 1). Условие обеспечения искробезопасности:  $W_p(T_p) \leq W_B(T_p, E)$ .

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

В третьем разделе «Разработка метода расчетной оценки искробезопасности разрядов, возникающих при размыкании электрических цепей источников питания с динамической защитой» была уточнена математическая модель разряда в индуктивно-резистивных цепях, определена расчётным и экспериментальным путем динамика тепловой постоянной инерции электрической дуги  $\tau$  в процессе разряда, получил дальнейшее развитие метод расчётной оценки искробезопасности сложных индуктивно-резистивных цепей.

Отражение физических процессов в электрической дуге описывается системой на основе уравнения Майра (3), характеризующей ток, напряжение, проводимость разряда и учитывающей динамическую вольтамперную характеристику дуги (ВАХ), скорость коммутации, тепловую постоянную инерции  $\tau$  (с учетом динамических свойств плазмы разряда), баланс отводимой и поступающей мощности дуги:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{g u_D^2}{P_D} - 1 \right) \\ i_D = g u_D \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $g$  – проводимость дуги, См;  $t$  – текущее время разряда, с;  $\tau$  – тепловая постоянная инерции дуги, с;  $u_D$  – напряжение столба дуги, В;  $i_D$  – ток дуги, А;  $P_D$  – отводимая от дуги мощность, Вт.

Отводимая от дуги мощность  $P_D$  представляется упрощенно с использованием статической вольтамперной характеристики дугового разряда  $u_D = u_K + (ad + \frac{bd}{i_D})vt$  в виде:

$$P_D = \left[ u_K + E_{д.ср} (i_D) l_D \right] i_D = i_D (u_K + ad \cdot v \cdot t) + bd \cdot v \cdot t \quad (4)$$

где  $l_D$  – длина дугового разряда, 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.

В процессе исследований выявлены и устранены недостатки модели дугового разряда известного расчётного метода, приводящие к неудовлетворительной сходимости расчётных предельных искробезопасных параметров с данными экспериментальных испытаний. Разработанная компьютерная модель дугового разряда в пакете MicroCAP-12 (рисунок 3) включает в себя следующие уточнения:

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

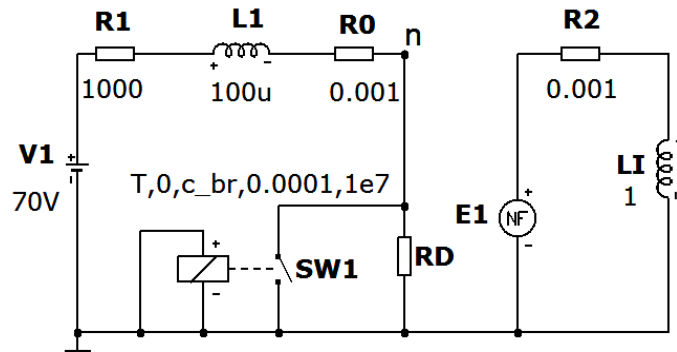
- определение отводимой от дуги мощности  $PDI$  производится с учетом  $u_K$  по формуле (4) и используется для вычисления мгновенных значений средней мощности разряда  $D$  с помощью выражения  $SDT(PDI)/(T-c_{br})$ ;

- расчет тепловой постоянной инерции дугового разряда  $\tau$  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,
2.9,0.0139,3,0.0142,4,0.0169,5,0.0191,6,0.0211,7,0.0229,8,0.0243,9,0.026,10,0.0274,15,0.0334,20,0.0382,30,0.0458,
40,0.0519,50,0.0571,60,0.0617,80,0.0695,90,0.0729,100,0.0761,110,0.08,120,0.0828,130,0.086,140,0.0885,150,
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((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— Расчётная схема моделирования процесса дуговой коммутации резистивной и индуктивной цепи

Для формирования проводимости использован источник напряжения  $E1$ , который задает напряжение  $V(E1)$ , соответствующее правой части 1-го уравнения системы (3):

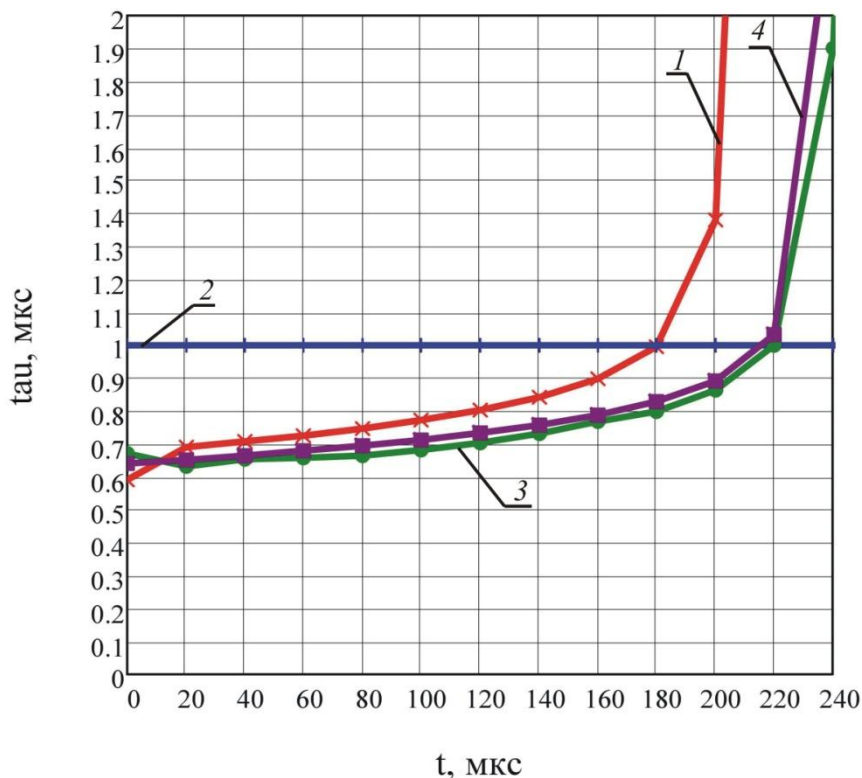
$$V(E1) = \frac{d \ln g(t)}{dt} = \frac{STP(c_{br}) \cdot (1/\tau) \cdot e^{I(LI)} \cdot V(RD)^2}{I(R0) \cdot (8 + ad \cdot vs \cdot (T - c_{br})) + bd \cdot vs \cdot (T - c_{br})} - 1 \quad (5)$$

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;  $vs$  – скорость коммутации, мм/с.

Ток, протекающий через дополнительную индуктивность  $LI = 1$  Гн, определяет интеграл от напряжения источника  $V(E1)$ , т.е.  $I(LI) = \ln(g)$ . Следовательно, проводимость дуги  $g = \exp(I(LI))$ , а сопротивление  $RD = 1/e^{I(LI)}$  – соответствует левой части 1-го уравнения системы (3).

Резистор  $R0$  определяет активное сопротивление проводов. Сопротивление резистора  $RD$  моделирует разряд размыкания. Ключ  $SW1$  служит для моделирования замкнутых контактов электрической цепи до коммутации и разомкнутых контактов после коммутации ( $T \geq c_{br}$ ).  $V1$ ,  $R1$ ,  $LI$  – элементы оцениваемой цепи.

Тепловая постоянная инерции электрической дуги  $\tau$  характеризует её тепловую инерционность и определяется теплофизическими характеристиками дугового канала. Расчёт  $\tau$  по экспериментальным данным разряда размыкания со скоростью 1 м/с резистивной цепи 24 В, сопротивлением 20 Ом (рисунок 4) произведён методом, предложенным Таевым И.С., а также расчётным путем по уточненной модели (рисунок 3), модели известного метода-прототипа.



Метод основан на уравнении динамической ВАХ дуги:

$$R_d \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{R_d} \right) = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u_d i_d}{P_0 l_d} - 1 \right) \quad (6)$$

где  $R_d$  – сопротивление дуги, Ом;  $P_0$  – мощность, отводимая от единицы длины дуги, Вт;  $l_d$  – длина дугового разряда (межконтактное расстояние), мм.

Тепловая постоянная инерции дуги в соответствующей точке  $A$  массива расчетных данных:

$$\tau = \frac{1}{(P_0 l_d)_A (dy/dx)_A} \quad (7)$$

Рисунок 4 — Зависимости тепловой постоянной инерции дуги от времени

где 1 – модель известного метода-прототипа;  
2 – модель метода с  $\tau = 1$  мкс;  
3 – эксперимент; 4 – уточненная модель метода  
где

$$y = \frac{1}{R_d} \frac{dR_d}{dt}; \quad x = u_d i_d \quad (8)$$

$$(P_0 l_d)_A = (u_d i_d)_A - \frac{\left[ \frac{1}{R_d} (dR_d / dt) \right]_A}{(dy/dx)_A}$$

Установлено, что за период коммутации  $\tau$  изменяется в 1,4 раза и имеет экспоненциально возрастающий характер (рисунок 4). Ее динамика роста и порядок величины уточнённой модели приближены к экспериментальным данным.

Получил дальнейшее развитие метод бескамерной оценки искробезопасности сложных индуктивно-резистивных цепей. Суть метода заключается в сравнении энергии разряда  $W_p(T_p)$ , полученной путем моделирования исследуемой цепи (рис.3) при различных скоростях коммутации с минимальной воспламеняющей энергией  $W_b(v, T_p)$  по известным уравнениям Бершадского И.А. Условие обеспечения искробезопасности  $W_p(T_p) \leq W_b(v, T_p)$ .

Апробация усовершенствованного метода искробезопасности на источниках питания с динамической защитой путем сравнения полученных модельных значений допустимой индуктивности  $L_{гр}$  с данными испытаний с помощью искрообразующего механизма показала, что его погрешность составляет не более 4 %.

**Четвёртый раздел «Обоснование безопасных параметров искробезопасных источников питания систем освещения»** посвящен получению аналитических зависимостей допустимого искробезопасного тока источников питания с динамической защитой для предварительной оценки их искробезопасности с кабельной линией, разработке схемы источника питания для системы освещения КУОШ и обоснованию его параметров искробезопасности.

Предварительную оценку искробезопасности систем освещения очистных выработок целесообразно проводить упрощенным способом, который сводится к сравнению величин энергии разряда  $W_p$ , полученной по уравнению Кравченко В.С (9) с минимальной допустимой энергией воспламенения  $W_{доп}$  (по результатам исследований Бершадского И.А) в зависимости от длительности разряда  $T_p$ :

$$W_p = (I - I_1) \cdot (U + 2I_1R) \cdot T_p / 6 + L \cdot (I^2 - I_1^2) / 2 \quad (9)$$

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.

Предложено выражение (10) расчета тока обрыва, учет которого обеспечивает максимальное значение энергии разряда в сравнении с известными способами (выражение Абраменко И.Г и ГОСТ Р 51330.10-99).

$$I_1 = \frac{1}{2} \cdot T_p \frac{2RI - U}{3L + 2RT_p} \quad (10)$$

По выражению (9), с учетом (10) получены зависимости  $I(U, T_p, L)$  допустимых искробезопасных токов  $I$  источников питания с временем срабатывания их динамической защиты  $T_{и}$  от 1 до 15 мкс, выходным напряжением  $U$  от 30 до 90 В, индуктивностью  $L$  от 30 мкГн до 5000 мкГн, при которых выполняется граничное условие искробезопасности  $W_{доп} - W_{12м} = 0$ .

Таблица 2 - Уравнения регрессии и их коэффициенты для диапазона напряжений от 30 до 50 В

$a_{30\_50}^1(U) = 1.35 \cdot 10^3 \cdot \ln(U) - 460.45 \cdot \sqrt{U} - 1.81 \cdot 10^3$
$b_{30\_50}^1(U) = 0.32 \cdot \ln(U) - 9.84 \cdot 10^3 \cdot U - 0.89$
$c_{30\_50}^1(U) = -404.71 \cdot \sqrt{U} + 34.43 \cdot U + 986.94$
$a_{30\_50}^2(U) = 0.01 \cdot \ln(U) - 0.01 \cdot \sqrt{U} + 6.91 \cdot 10^{-4} \cdot U$
$b_{30\_50}^2(U) = 0.06 \cdot \sqrt{U} - 8.86 \cdot 10^{-3} \cdot U + 1.42$
$c_{30\_50}^2(U) = 0.02 \cdot \ln(U) - 8.09 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{U} - 0.53$
$a_{30\_50}^3(U) = -0.02 \cdot \ln(U) + 5.59 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{U} + 0.02$
$b_{30\_50}^3(U) = -0.36 \cdot \sqrt{U} + 0.04 \cdot U + 2.14$
$c_{30\_50}^3(U) = 0.11 \cdot \ln(U) - 0.04 \cdot \sqrt{U} - 0.14$
$a_{30\_50}(T_{и}, U) = a_{30\_50}^1(U) \cdot T_{и}^{b_{30\_50}^1(U)} + c_{30\_50}^1(U)$
$b_{30\_50}(T_{и}, U) = a_{30\_50}^2(U) \cdot T_{и}^{b_{30\_50}^2(U)} + c_{30\_50}^2(U)$
$c_{30\_50}(T_{и}, U) = a_{30\_50}^3(U) \cdot T_{и}^{b_{30\_50}^3(U)} + c_{30\_50}^3(U)$
$I(L, T_{и}, U) = a_{30\_50}(T_{и}, U) \cdot L^{b_{30\_50}(T_{и}, U)} + c_{30\_50}(T_{и}, U)$

Для массивов полученных данных  $I$  найдены аналитические зависимости  $I(L, T_{и}, U)$  путем аппроксимации регрессионными уравнениями степенной функции  $y(x) = a \cdot x^b + c$ . Найдены аналитические выражения для коэффициентов аппроксимации (например, для напряжений от 30 до 50 В они приведены в таблице 2), оценен коэффициент корреляции для всех уравнений  $R=1$ .

Погрешность расчетных значений искробезопасного тока с помощью уравнений (таблица 2) и значений согласно выражению (9) не превышает 5 %.

В процессе исследований обоснованы параметры и разработана электрическая схема искрозащиты источника питания КУОШ.200 (рисунок 5), в которой учтена амплитуда и запаздывание управляющего сигнала о начале коммутации в кабельной линии КГВШ сечением 6 мм<sup>2</sup> и длиной 400 м.

Погрешность расчетной оценки (по уточненным моделям) источника питания КУОШ.200 в сравнении с экспериментальной составляет не более 5% (таблица 3).

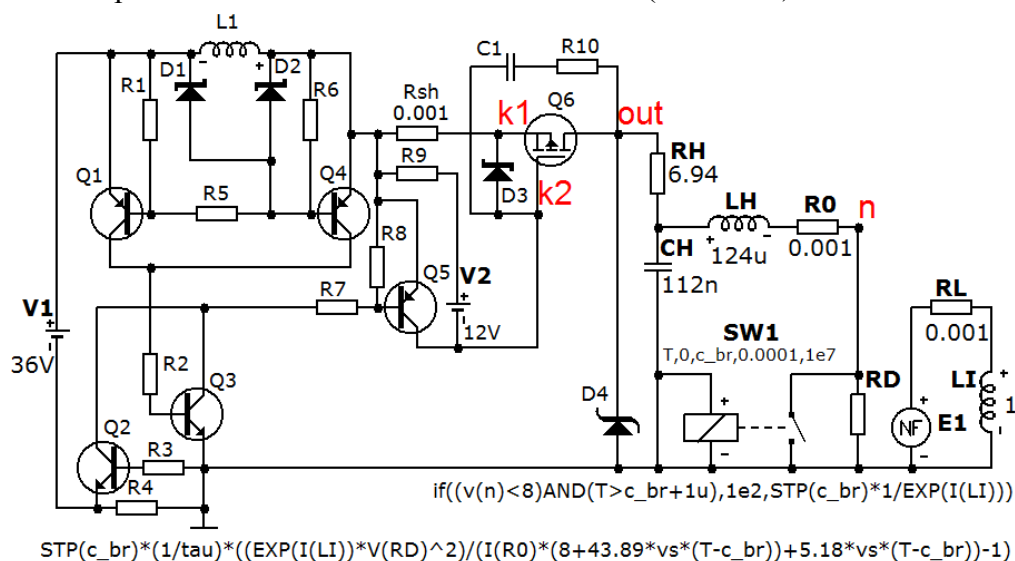


Рисунок 5— Схема электрическая принципиальная искрозащиты источника питания КУОШ.200

Таблица 3 — Результаты оценки искробезопасности источника питания КУОШ.200

Максимально допустимая внешняя индуктивность $LH$ , мкГн		Параметры разряда		Максимально допустимая внешняя ёмкость $CH$ , 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-ёмкостная
-	-	4,9	860	2	2,1	Ёмкостная



Рисунок 6— Комплекс устройств освещения шахтного КУОШ

Научные положения диссертационной работы реализованы в схемотехнических решениях опытного образца комплекса устройств освещения шахтного КУОШ (рисунок 6). Комплекс предназначен для освещения искробезопасными светодиодными светильниками рабочей зоны очистного забоя, оснащенного механизированной крепью и энергопоездом, расположенным на штреке (ЧАО «НПП «МЗША», г. Макеевка).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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  $W_{в}(Tr, E)$  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 мм<sup>2</sup>.

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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *- в рецензируемых научных изданиях ВАК России:*

1. Бершадский, И. А. Оптимизация технических характеристик шахтного освещения с учетом предельных параметров искробезопасности/ И.А. Бершадский, А.Ю. Гладков // Безопасность труда в промышленности. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, — 2016. — №7. — С. 41—47.
2. 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. —№2. — С. 13—19.

### *- в рецензируемых научных изданиях ВАК Украины:*

3. Иохельсон, З.М. Определение искробезопасных параметров безреактивных электрических цепей рудничного оборудования/ З.М. Иохельсон, А.Ю. Гладков, В.Л. Задорожня// Уголь Украины. – Киев, —2007.—№ 3. —С. 38—40.
4. Бершадский, И.А. Разработка методики сертифицирования и конструирования блоков искрозащиты рудничного электрооборудования/ И.А. Бершадский, А.Ю. Гладков, Л.С. Соломатина// Наукові праці ДонНТУ. —2013.—1(14). — С. 23—28.— URL:<http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/23135/1/023.pdf>.

### *- в других изданиях :*

5. 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. —Макеевка: Издание МАКНИИ, — 2015. —1(35).—С.46—55.
6. Гладков, А.Ю. Экспериментальные исследования разряда короткого замыкания ёмкостной искробезопасной цепи/ А.Ю. Гладков, И.А. Бершадский, А.П.Ковалёв// Взрывозащищенное электрооборудование. —Донецк: НИИВЭ, —2017.— С.154—164.
7. Бершадский, И.А. Совершенствование математической модели разряда ёмкостной искробезопасной цепи/ И.А. Бершадский, С.В.Шлепнев, А.Ю. Гладков// Вестник ДонНТУ. – Донецк.:ДонНТУ, — 2019.—1(15). — С.51—58.— URL:<http://vestnik.donntu.org/dl/2019/01/bershadskiy.pdf>.

### Тезисы

8. Гладков, А.Ю. Особенности искробезопасных источников питания/А.Ю. Гладков, И.А. Бершадский// Завалишинские чтения'16: сборник докладов международной научно-технической конференции, г. Санкт Петербург, 11-15 апреля 2016 г. – Санкт Петербург: ГУАП, 2016. – С.30-33.
9. Гладков, А.Ю. Метод оценки искробезопасности шахтных систем освещения с источниками питания, отключаемых при коммутации / А.Ю. Гладков, Д.П. Тычинский, А.В. Цмыкайло // Инновационные перспективы Донбасса г. Донецк, 24-26 мая 2017 г. Т. 2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. — 2017. — С. 9—15.
10. Бершадский, И.А. Экспериментальные исследования разряда короткого замыкания ёмкостной искробезопасной цепи/ И.А. Бершадский, А.Ю. Гладков // Интеграция науки и образования как основа эволюции Евразийского экономического союза: сб.ст. из материалов Евразийского научного форума 08 декабря 2017 г.СПб. : Университет при МПА ЕврАзЭС, 2017. — С. 114—124.

### *Учебные и справочные пособия*

11. Методика расчётной оценки искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока рудничного электрооборудования / А.Ю. Гладков, И.А. Бершадский, А.П. Ковалёв и др.: ред. А.Ю. Гладков, И.А. Бершадский. – Донецк: ГОУВПО «ДОННТУ», ГУ «МАКНИИ», 2019. –38 С.



***Патенти на изобретения и полезную модель***

12. Патент UA56753 А Україна, 7 E21F9/00. Спосіб оцінки режимів роботи іскрозахистних елементів/ Діденко В.П., Брюханов О.М., Кудінов Ю.В., Гладков О.Ю.; МакНДІ. – № 2002097112; заявл. 02.09.2002; опубл. 15.05.2003, Бюл. № 5 – 4 С.
13. Патент UA68987 А Україна, 7 E21F9/00. Блок для іскрозахисту кіл дистанційного керування/ Діденко В.П., Гладков О.Ю., Шапран Ю.Г., Громовий М.А., Горохов О.В.; МакНДІ. – № 20031110610; заявл. 25.11.2003; опубл. 16.08.2004, Бюл. № 8 – 3 С.
14. Патент UA61198 Україна, МПК(2011.01), H01H 33/66 (2006.01). 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.; МакНДІ. – № U2010 15765; заявл. 27.12.2010; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13 – 4 С.
15. Патент UA61807 Україна, МПК (2011.01), F21L 2/00. Блок іскрозахисту / Брюханов О.М., Коптиков В.П., Гладков О.Ю., Муфель Л.А., Гречка А.В.; МакНДІ. – № U2011 01409; заявл. 08.02.2011; опубл. 25.07.2011, Бюл.№ 14– 4 С.



Подписано в печать 18.11.2021. Формат 60x84x1/16. Усл. печ. л. 1,0. Печать лазерная  
Бумага 80г/м2. Тираж 100 экз. Заказ № 1619.  
Отпечатано в типографии ЧП «ПОЛИПРЕСС» г. Макеевка, ул. Плеханова , 1  
тел (0623) 22-22-56  
Свидетельство о регистрации ДНР серия АА01 №13635 от 29 октября 2014 г.