

На правах рукописи



КУЛИКОВСКИЙ КИРИЛЛ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

Транзисторное устройство защиты авиационных систем распределения  
электроэнергии от аварийных электрических разрядов

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре 306 «Микроэлектронные электросистемы» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Машуков Евгений Владимирович

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Лукин Анатолий  
Владимирович, генеральный директор  
закрытого акционерного общества «ММП-  
Ирбис» (г. Москва)

к.т.н. Манбеков Дмитрий Рауфович, начальник  
сектора акционерного общества  
«Государственный научно-исследовательский  
институт приборостроения» (г. Москва)

Ведущая организация: акционерное общество «Аэроэлектромаш»,  
127015, г. Москва, ул. Б. Новодмитровская,  
д. 12.

Защита состоится 29 ноября 2016 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, главный административный корпус, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и на сайте: <http://www.mai.ru/events/defence>.

Ваш отзыв на автореферат в количестве двух экземпляров, заверенных печатью, просьба направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.07

В.С. Степанов

**Актуальность темы.** Явление электрической дуги (в английском языке «arc fault» – аварийная дуга, в немецком «Lichtbogen» – электрическая дуга) изучено достаточно полно как с позиций её использования (например, для электросварки), так и с позиций борьбы с ней в контактной высоковольтной аппаратуре. Начиная примерно с 2000 года, число исследований по ликвидации дуги в самолётных системах электроснабжения (СЭС) резко увеличилось. Толчком к этому послужили две тяжёлые авиационные катастрофы пассажирских самолётов в 1996 и 1998 годах, причинами которых предположительно стали возгорания после образования аварийных электрических разрядов. К 2000 году в США была разработана программа, направленная на разработку средств борьбы с аварийными электрическими разрядами в бортовых системах летательных аппаратов. В последующее десятилетие работы в данном направлении существенно интенсифицировались.

Наряду с самолётными системами, необходимость борьбы с аварийными электрическими дугами возникла у разработчиков автомобильных СЭС в связи с тенденцией к повышению бортового напряжения постоянного тока до уровня 36...42 В. В последние годы возросло число публикаций по методам борьбы с аварийными дугами в наземных системах электропитания бытовой техники от солнечных батарей с повышенным уровнем напряжения. Однако, проблема обнаружения и ликвидации дуги в самолётных системах оказалась существенно сложнее, чем в наземных или в автомобильных по нескольким причинам, а именно:

- в силу наличия значительных по амплитуде пульсаций сетевых напряжений широкого частотного спектра, которые могут быть приняты за помехи от дуги;
- из-за наличия электрических нагрузок, создающих дополнительные циклические помехи в сети;
- из-за внедрения перспективных СЭС с повышенным напряжением переменного тока 230/400 В и систем постоянного тока повышенного напряжения 270 В, в которых условия возникновения дуги особенно благоприятны;
- из-за наличия переходных процессов при коммутации многочисленных бортовых нагрузок;
- в силу значительных по амплитуде всплесков напряжения в сетях при отключении индуктивных нагрузок;
- из-за отсутствия в системах переменного тока нулевого провода, а в системах постоянного тока – минусового провода (в качестве

которых используется металлический корпус самолёта), что затрудняет использование дифференциальных защит.

Наименее затратным путём реализации защиты от аварийных дуговых разрядов является разработка функционально необходимых электронных средств в качестве дополнения к существующей контактной или бесконтактной коммутационно-защитной аппаратуре (КЗА). Это могут быть дополнительные электронные блоки в тепловых аппаратах защиты, дополнительные блоки в транзисторных аппаратах защиты и коммутации (АЗК), которые в зарубежной литературе обозначаются как SSPC (Solid State Power Controller). Наибольшее поле для исследований предоставляют традиционные низковольтные авиационные системы постоянного тока, как не имеющие функциональных наземных прототипов, а также содержащие разветвлённые структуры и весьма разнообразные электрические нагрузки.

**Цель и задачи работы:** разработка методов защиты авиационных низковольтных электросетей постоянного тока от аварийных дуговых разрядов и средств технической реализации этих методов в виде транзисторных устройств защиты от перегрузок по току с дополнительными функциями индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов параллельного и последовательного типов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Провести анализ и классифицировать известные методы индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых системах электроснабжения.
2. Разработать методы и технические средства индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов параллельного типа с использованием новых функциональных возможностей транзисторной коммутационно-защитной аппаратуры.
3. Провести дополнительные исследования аварийных дуговых разрядов последовательного типа в условиях низковольтных авиационных систем постоянного тока с учётом возможного воздействия механических вибраций на электрические процессы в дуге.
4. Оценить применимость известных методов индикации последовательной дуги в условиях авиационных низковольтных систем постоянного тока.
5. Разработать методы и технические средства ликвидации аварийных дуговых разрядов последовательного типа в авиационных электросетях постоянного тока с типовыми нагрузками систем электроснабжения.

**Объект исследования:** устройства защиты электросетей от аварийных дуговых разрядов.

**Предмет исследования:** принципы построения электронных устройств защиты электросетей от аварийных дуговых разрядов.

**Область исследований:** авиационные низковольтные электросети постоянного тока.

**Научная новизна.**

1. Исследованы и разработаны электронные устройства нового типа, предназначенные для индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в авиационных низковольтных электросетях постоянного тока, сформированные как дополнение к транзисторным аппаратам коммутации и защиты.

2. Установлено, что описания известных способов индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов не содержат исчерпывающих сведений, достаточных для аппаратурной реализации электронных устройств защиты от аварийных дуговых разрядов в авиационных низковольтных электросетях постоянного тока.

3. Предложены метод и средство его реализации для ликвидации установившейся, либо прерывистой параллельной дуги, основанные на способности транзисторных аппаратов защиты к амплитудному ограничению аварийных токов.

4. Исследованиями процессов возникновения и развития дуговых разрядов последовательного типа в низковольтных цепях постоянного тока пополнены сведения об их характерных свойствах:

- установлено, что вероятность возникновения последовательной дуги между расходящимися контактами максимальна при индуктивном характере нагрузки и минимальна при емкостных нагрузках и электродвигательных нагрузках с внутренней ЭДС;
- установлено, что вольтамперная характеристика дуги при малых зазорах между электродами может иметь экстремум (минимум напряжения), а степень изменения тока нагрузки за счёт потерь напряжения на дуге находится в пределах 50...70%, что может быть использовано для создания схем индикации дуги;
- обнаружено, что размах пульсаций тока дуги максимален в момент её возникновения, непропорционален среднему току, зависит от материала контактов и коррелируется по этому пункту с напряжениями статических ВАХ.

5. Разработаны и исследованы компьютерные модели и лабораторные макеты устройств ликвидации последовательной дуги постоянного тока, основанные на индикации её характерных признаков: наличии интенсивного шума, хаотичности параметров шума, наличии факта рекурсивности и «фликкер-эффекта» и др. Показано, что для каждого из рассмотренных вариантов существуют ограничения, исключающие их универсальность, а общим ограничением является чувствительность к электромагнитным помехам из аварийных цепей.

6. Разработаны методы, функциональные схемы, компьютерные модели и лабораторные макеты индикаторов последовательной дуги, построенные по принципу мониторинга за аварийными изменениями энергетических параметров в цепях типовых нагрузок авиационных низковольтных систем постоянного тока.

#### **Практическая полезность.**

1. Результаты анализа методов индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых СЭС постоянного и переменного тока.

2. Технические средства ликвидации устойчивой и прерывистой дуги параллельного типа в авиационных низковольтных электросетях постоянного тока.

3. Описания портативных стендов для исследования характерных свойств устойчивых и прерывистых дуговых разрядов.

4. Технические средства индикации последовательной дуги постоянного тока по её характерным признакам.

5. Технические средства индикации последовательной дуги по фактам изменения энергетических параметров в цепях типовых авиационных нагрузок постоянного тока

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач используются общие положения теории электрических цепей, имитационное компьютерное моделирование индикаторов дуги, физическое (натурное) моделирование аварийных дуговых процессов и электронных средств их ликвидации.

#### **Реализация результатов работы.**

Материалы диссертационной работы были использованы в госбюджетных НИР МАИ, договоры №№ 45910-03060, 46800-03060, в курсе лекций, в дипломном и курсовом проектировании кафедры «Микроэлектронные электросистемы», а также при подготовке монографии «Устройства защиты авиационных электросетей от аварийных дуговых

разрядов» Е.В. Машуков, Г.М. Улященко, Д.А. Шевцов. –М.: Изд-во МАИ, 2016. – 160 с.

### **Достоверность.**

Достоверность полученных научных результатов, отраженных в диссертационной работе, подтверждается корректным использованием положений теории электрических цепей, имитационным компьютерным моделированием, с использованием лицензионных сертифицированных программ, а также результатами натурных испытаний полученных лабораторных макетов.

### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись на следующих конференциях и выставках:

- 12-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2013» (г. Москва, 2013г.);
- 13-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2014» (г. Москва, 2014 г.);
- 11-я международная выставка «Силовая электроника – 2014» (г. Москва, 2014 г.);
- 42-я международная конференция «Гагаринские чтения – 2016» (г. Москва, 2016 г.).

### **Публикации.**

По результатам исследования опубликовано 7 научных работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

### **Структура и объём работы.**

Диссертационная работа изложена на 156 страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Работа включает в себя 101 иллюстрацию и 2 таблицы.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты анализа известных методов индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых системах электроснабжения.
2. Метод и технические средства индикации и ликвидации дуги параллельного типа в низковольтных авиационных электросетях постоянного тока.
3. Результаты исследований аварийных дуговых разрядов последовательного типа в низковольтных авиационных электросетях постоянного тока.

4. Оценка применимости в условиях авиационных систем методов ликвидации последовательной дуги, основанных на индикации её характерных признаков.

5. Методы ликвидации последовательной дуги и средства их технической реализации, основанные на мониторинге изменений в цепях типовых нагрузок авиационных низковольтных электросетей, вызванных возникновением дуги.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, определены её научная новизна и практическая ценность, дана информация о структуре и объёме работы.

**В первой главе** изложены результаты анализа известных способов индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых системах электропитания, содержащиеся в обзорах, научно-технических статьях, патентной литературе, технических отчётах и фундаментальных научных трудах, опубликованных в открытой печати, начиная с 1992...1994 годов и по настоящее время. Предложена классификация проведённых ранее результатов исследований по следующим критериям:

- характеру исследований;
- назначению объектов с электросетями;
- глубине изменений, вносимых средствами защиты от дуги;
- физическим основам способов индикации;
- степени универсальности к роду тока и виду дуговых разрядов;
- месту размещения в системах;
- признакам, лежащим в основе методов индикации дуги.

Установлено, что наибольшее число публикаций относится к промышленным и бытовым СЭС переменного тока, что объясняется большим распространением таких систем. Прослеживается расширение области исследований по системам постоянного тока в связи с развитием перспективных автомобильных СЭС повышенного напряжения, а также в связи с расширением области применения автономных систем переменного тока с первичными системами постоянного тока на высоковольтных солнечных батареях.

Число публикаций по авиационным СЭС относительно невелико, несмотря на важность проблемы, ввиду ряда неблагоприятных условий для работы устройств защиты от дуги в таких системах: наличия



широкополосных сетевых помех, наличия импульсно-периодических нагрузок, отсутствия нулевого провода в СЭС переменного тока и минусового провода в СЭС постоянного тока. Число публикаций по защите авиационных СЭС постоянного тока существенно меньше, чем в СЭС переменного тока, хотя наибольшее количество сложных нагрузок приходится именно на системы постоянного тока.

В традиционных системах летательных аппаратов, находящихся в эксплуатации, неприменимы методы защиты от дуги, требующие коренных изменений в структурах систем: оптические, тепловые, электромагнитные, а также те из электрических, которые предполагают установку дополнительных датчиков и прокладку дополнительных сигнальных или силовых проводов. Предпочтение следует отдать тем методам, которые ограничиваются модернизацией существующих аппаратов защиты электрических сетей от токовых перегрузок.

Существуют две основных группы методов защиты от дуги. Первая для обнаружения дуги использует её характерные признаки: наличие широкополосного «розового» шума, хаотичность изменения параметров шума и др. Вторая группа основана на сравнении аварийных электрических процессов в фидерах с нормальными. Достоинства первой группы – универсальность к нагрузкам, роду тока и характеру дуги. Достоинства второй группы – нечувствительность к помехам, малая вероятность ложных отключений исправных участков сети.

подавляющее число рассмотренных в ходе анализа технических решений нацелено на разработку электронных средств, дополняющих тепловые, либо в редких случаях – электронные аппараты защиты. Практически не используются новые силовые и диагностические возможности транзисторных аппаратов защиты постоянного тока для расширения их функций на область защиты от дуги.

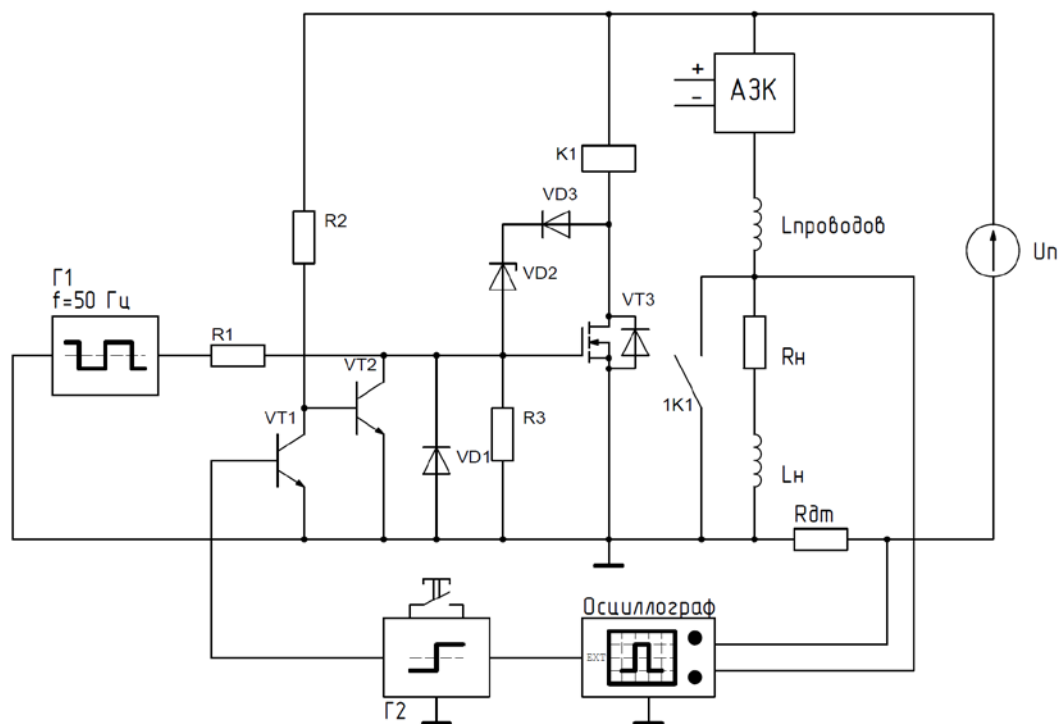
Рассмотренные технические публикации, несмотря на их большой объём, не содержат исчерпывающих теоретических и прикладных материалов, достаточных для аппаратурной реализации электронных устройств защиты от дуги в авиационных сетях переменного и особенно постоянного тока.

**Во второй главе** изложен метод ликвидации аварийных дуговых разрядов параллельного типа в авиационных низковольтных электросетях постоянного тока, базирующийся на использовании новых свойств транзисторной коммутационно-защитной аппаратуры.

Параллельная дуга может возникать в процессе периодического касания проводом (с повреждённой изоляцией) металлического корпуса

самолёта, чему способствует вибрация корпуса с частотой 5...2000 Гц. Действующие значения токов в цепях «перемежающихся» коротких замыканий (КЗ) могут оказаться недостаточными для срабатывания традиционной тепловой аппаратуры защиты. Однако полупроводниковая (в первую очередь транзисторная) аппаратура коммутации и защиты обладает более широкими функциональными возможностями, нежели тепловая. Одним из них является способность к амплитудному ограничению токов при аварийных перегрузках. По факту ограничения тока запускается таймер, время выдержки которого рассчитано из условия нормального включения емкостной нагрузки (единицы миллисекунд). При возникновении перемежающегося КЗ силовой транзистор будет периодически выходить в режим ограничения, а интегратор таймера – увеличивать своё выходное напряжение. Аварийное отключение АЗК произойдёт спустя время выдержки, большее, чем время нормального заряда ёмкости нагрузки, но в пределах нескольких миллисекунд. При этом ток в дуге будет ограничен на уровне, соизмеримом с номинальным током АЗК.

Описанный принцип ликвидации перемежающегося КЗ был промоделирован и после этого исследован на лабораторном макете (рис. 1).



*Рис. 1. Функциональная схема лабораторного макета для испытаний АЗК в режиме ликвидации перемежающихся КЗ.*

Приведены осциллограммы ликвидации КЗ, созданного параллельно индуктивно-активной нагрузке с помощью контактов реле на частоте 50 Гц (рис. 2). Время ликвидации дуги составляет 3 мс.

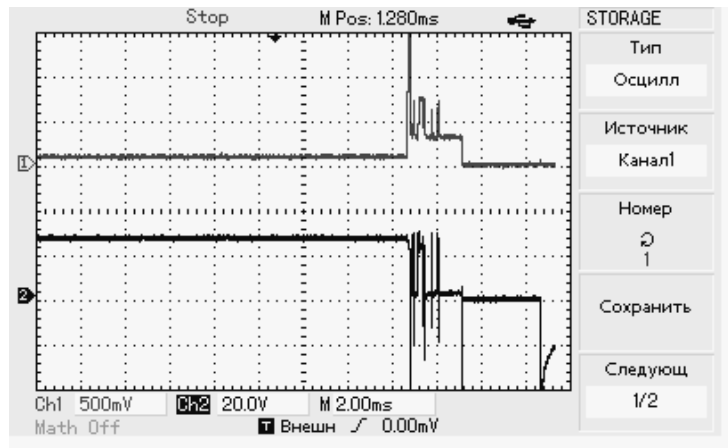


Рис. 2. Осциллограммы ликвидации КЗ активно-индуктивной нагрузки, созданного контактами реле на частоте 50 Гц.

В третьей главе изложены результаты исследований характерных свойств последовательной дуги в низковольтных авиационных электросетях постоянного тока, которая может возникать из-за ослабления электрических контактов в местах болтовых креплений проводов или при изломе жилы провода. Разработана схема, предназначенная для исследования процессов возникновения и развития дуги в цепях с нагрузками различного характера (рис. 3). Установлено, что напряжение на дуге в начальной фазе процесса не зависит от номинального значения тока, напряжения сети и конечного зазора, являясь характерной константой, позволяющей оценить минимальное изменение тока в фидере при возникновении дуги (рис. 4).

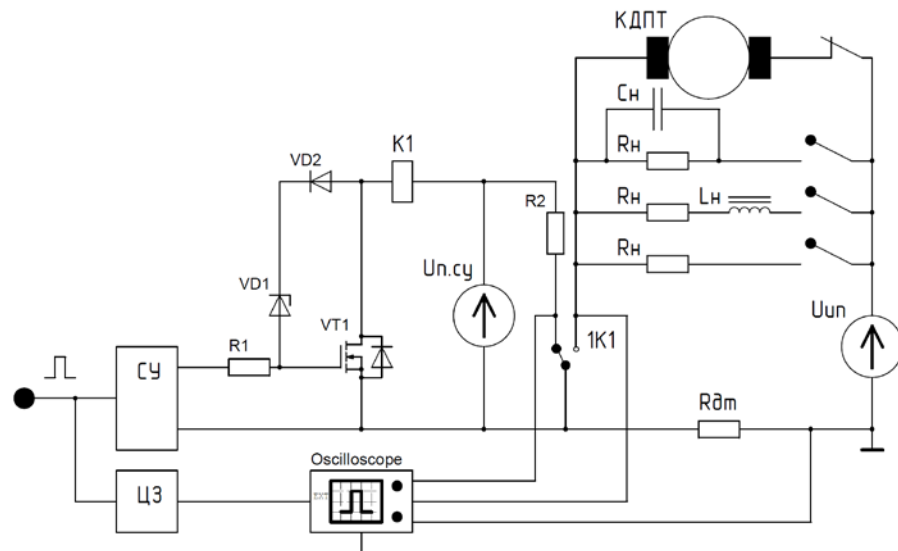
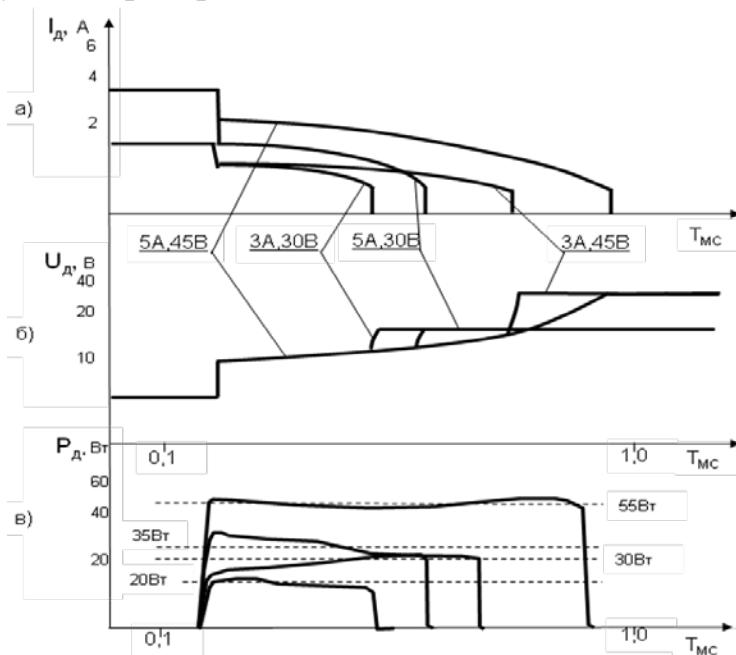


Рис. 3. Схема лабораторного макета для исследования возникновения и развития дуговых разрядов.

Установлено, что вероятность возникновения устойчивой дуги между расходящимися контактами максимальна в цепях с нагрузками индуктивного

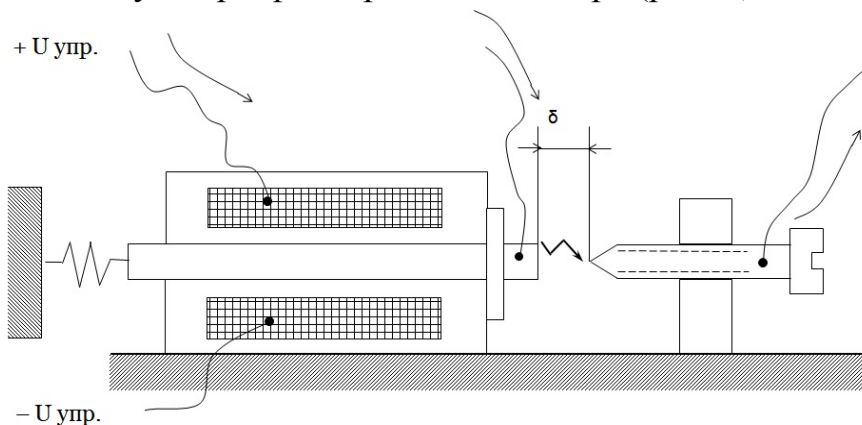
характера и мала в цепях с нагрузками емкостного характера, а также с коллекторными электродвигателями постоянного тока.

Разработан портативный стенд для исследования прерывистой последовательной дуги. Показано, что характер изменения тока в дуге зависит от материала контактов, напряжения сети и величины зазора, а общим свойством является факт пульсации тока между исходным значением и некоторым промежуточным уровнем соответствующим фазе горения дуги, что может послужить критерием её индикации.



*Рис. 4. Процессы возникновения и развития дуги в цепи с резистивной нагрузкой при вариации сопротивления нагрузки и напряжения источника питания: а) токи, б) напряжения, в) мощности.*

Разработан портативный стенд для исследования устойчивой последовательной дуги при фиксированном зазоре (рис. 5).



*Рис. 5. Схема стенда для создания дуги в контактном промежутке фиксированной длины.*

Разработаны схемы непрерывного и импульсного ограничителей тока для исследований статических ВАХ устойчивой дуги в режиме регулируемого тока через дугу при короткозамкнутой нагрузке. Установлено, что напряжение на дуге при одинаковых токах зависит от материала контактов и величины зазора. Обнаружено, что при малых зазорах напряжение на дуге может иметь экстремум (минимум) в функции тока, что объясняется, по-видимому, возрастающей долей омического сопротивления дугового столба при малой его длине (рис. 6).

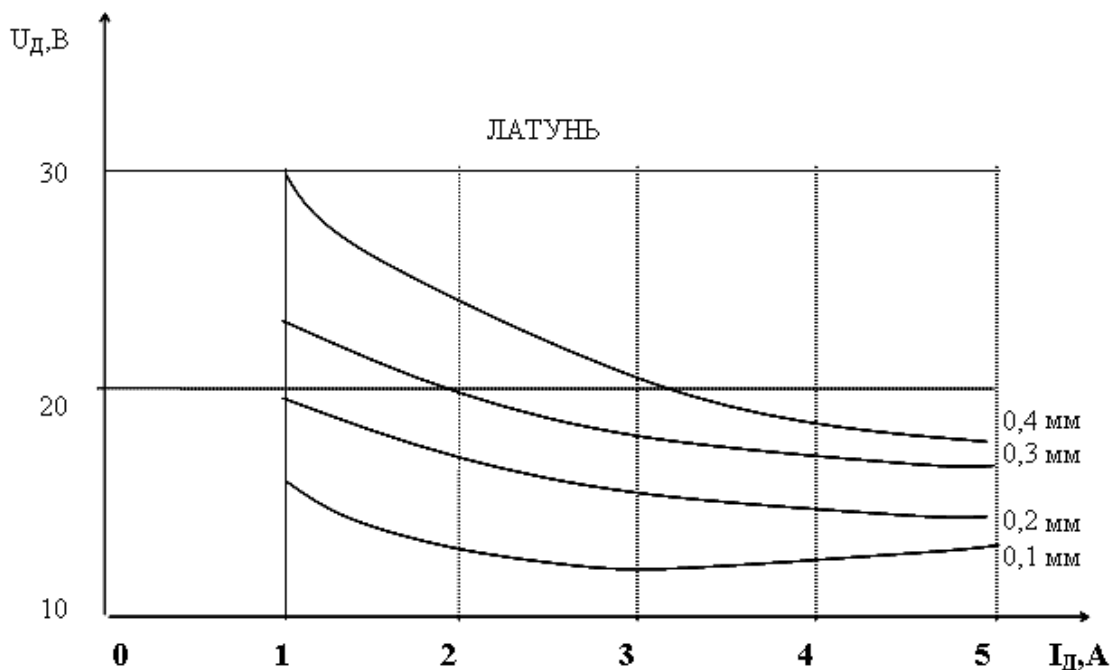
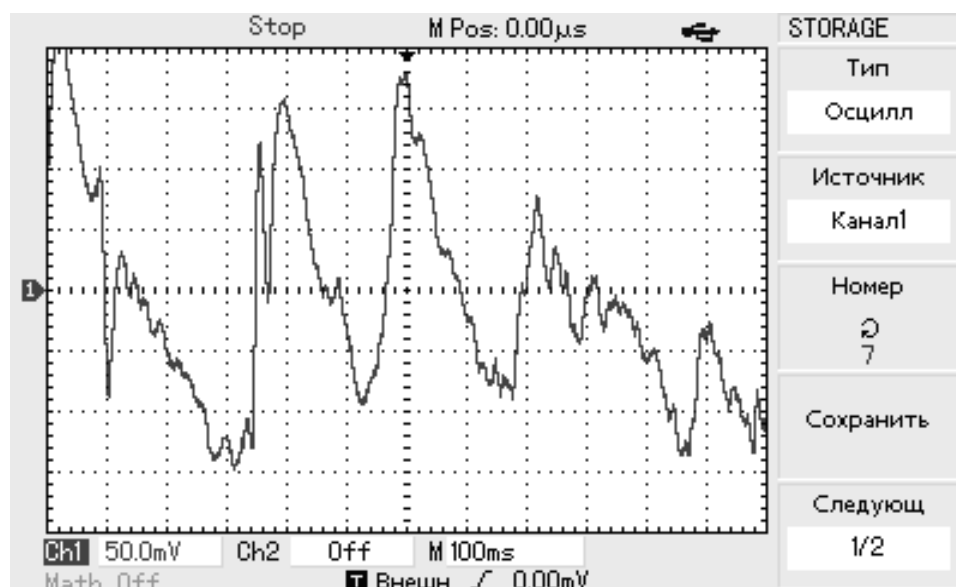


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики дуги между латунными электродами с различными зазорами (в мм).

Установлено, что при номинальном напряжении сети 27 В степень уменьшения напряжения на нагрузке и тока в цепи за счёт потерь напряжения на возникшей дуге может составить 50...70 %, что достаточно заметно на фоне нормированных отклонений тока типовых нагрузок и может быть использовано для создания схем индикации, контролирующей изменения токов в фидерах нагрузок.

Установлено, что размах пульсаций тока максимален в начальной стадии процесса развития дугового разряда, непропорционален среднему значению тока и растёт с увеличением зазора. Показано, что размах и частота пульсаций тока зависят от характера нагрузки (рис. 7).



*Рис. 7. Пульсации тока в дуге при RL нагрузке напряжении сети 40 В, с усилителем и НЧ фильтром.*

В цепях с резистивными нагрузками пульсации тока дуги и напряжения на дуге качественно зеркальны. Реактивные нагрузки действуют как фильтры, ослабляя пульсации тока (RL нагрузки), либо напряжения (RC нагрузки).

Установлено, что размах пульсаций зависит от материала контактов и коррелируется с параметрами статических ВАХ. Зависимость размаха пульсаций тока дуги от многих факторов существенно осложняет её индикацию по критерию сравнения текущего уровня пульсаций тока в контролируемом фидере с величиной нормированных пульсаций в авиационной сети.

**В четвёртой главе** приведены результаты исследований и разработки методов индикации последовательной дуги, основанных на обнаружении её характерных признаков в текущих процессах токов нагрузок.

Определены состав электрических нагрузок и уровни электромагнитных помех в авиационных низковольтных сетях постоянного тока. Выполнена оценка применимости метода индикации дуги по уровню её шума. Показана его применимость для цепей с нерегулируемыми RL нагрузками, а также для цепей с нерегулируемыми резистивными нагрузками при наличии ФНЧ фильтров в цепях обработки сигналов. Показана неприменимость метода в цепях с ИВЭ РЭА при наличии входных реактивных фильтров большой мощности (рис. 8).

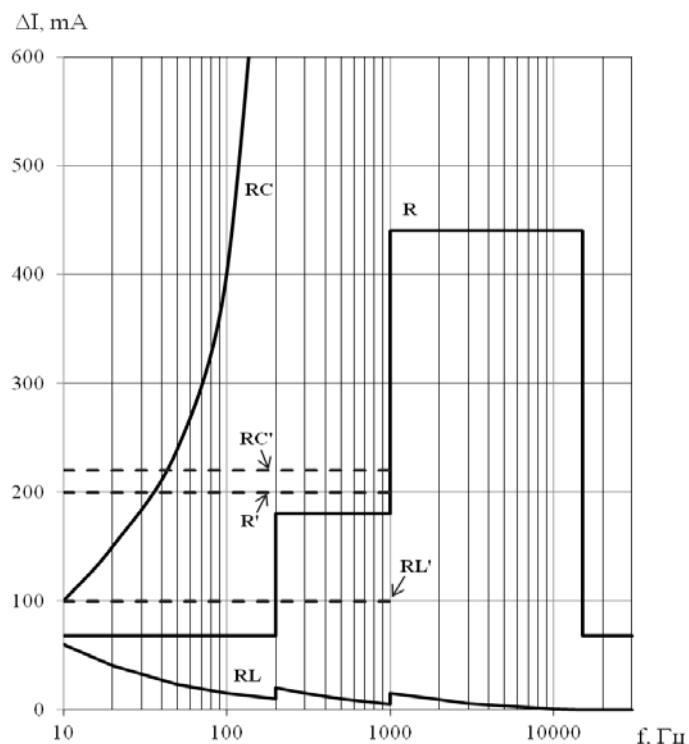


Рис. 8. Зависимости размаха пульсаций тока в фидерах с  $R$ ,  $RL$  и  $RC$  нагрузками от их частоты в диапазоне  $0,01 \dots 15$  кГц для авиационных СЭС постоянного тока напряжением  $27$  В.

Разработаны функциональные схемы, аналоговые модели и цифровые узлы ИД, построенных по критерию наличия шума, для цепей с нерегулируемыми  $RL$  нагрузками (рис. 9, 10).

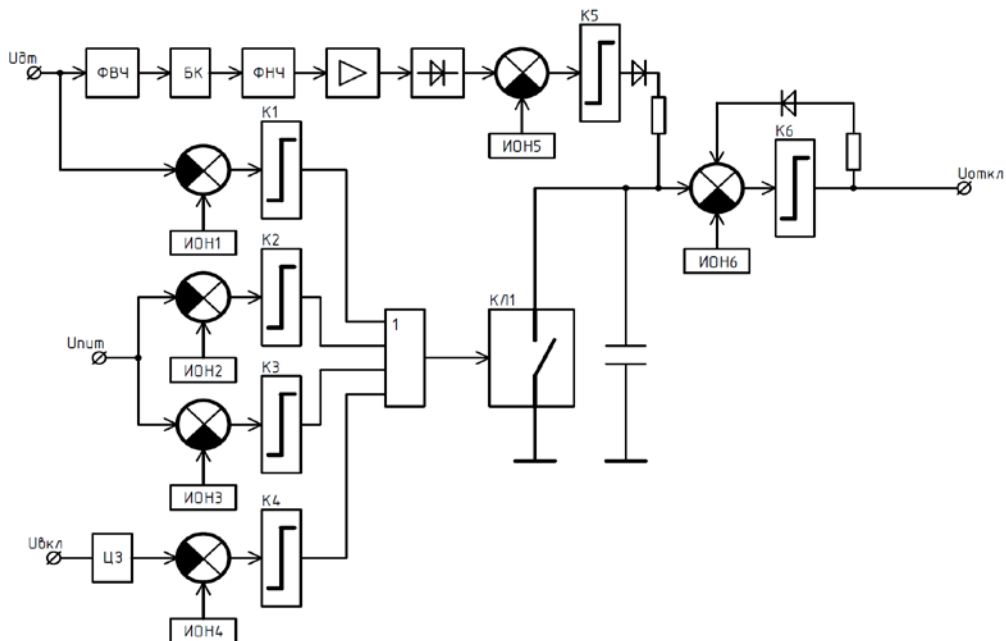


Рис. 9. функциональная схема индикации дуги в  $RL$  и  $R$  нагрузках по уровню шума.

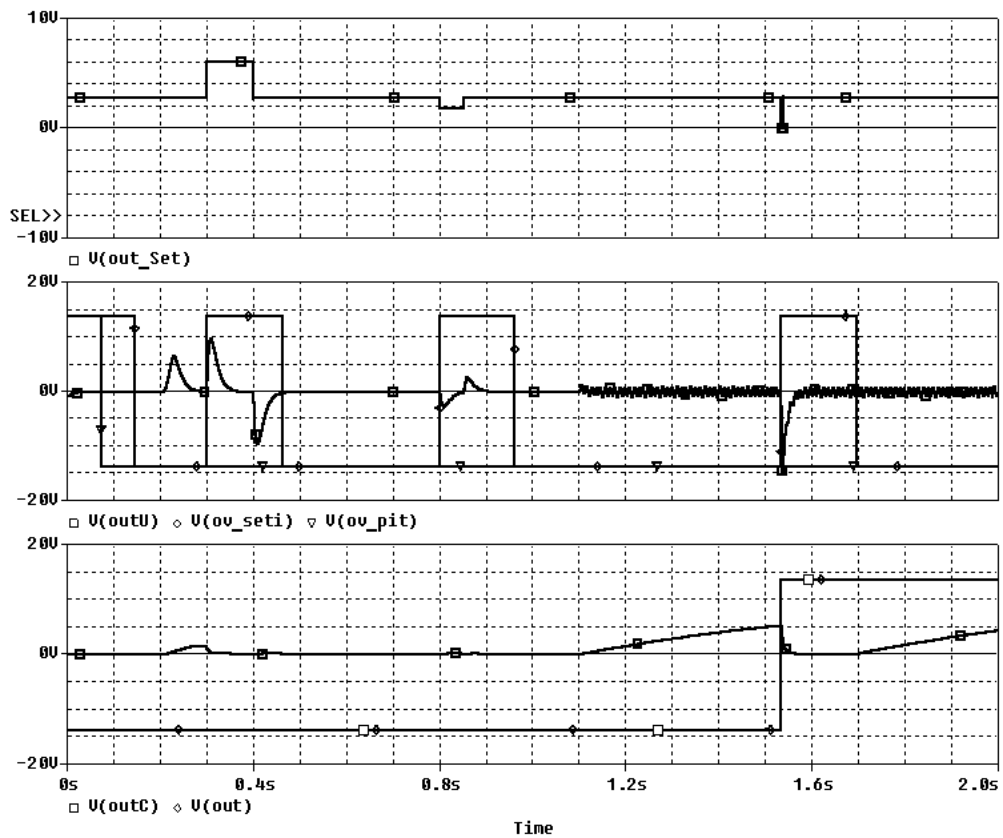


Рис. 10. Временные диаграммы процессов в схеме на рис. 9.

Работоспособность ИД подтверждена моделированием и испытаниями на лабораторном стенде (рис. 11).

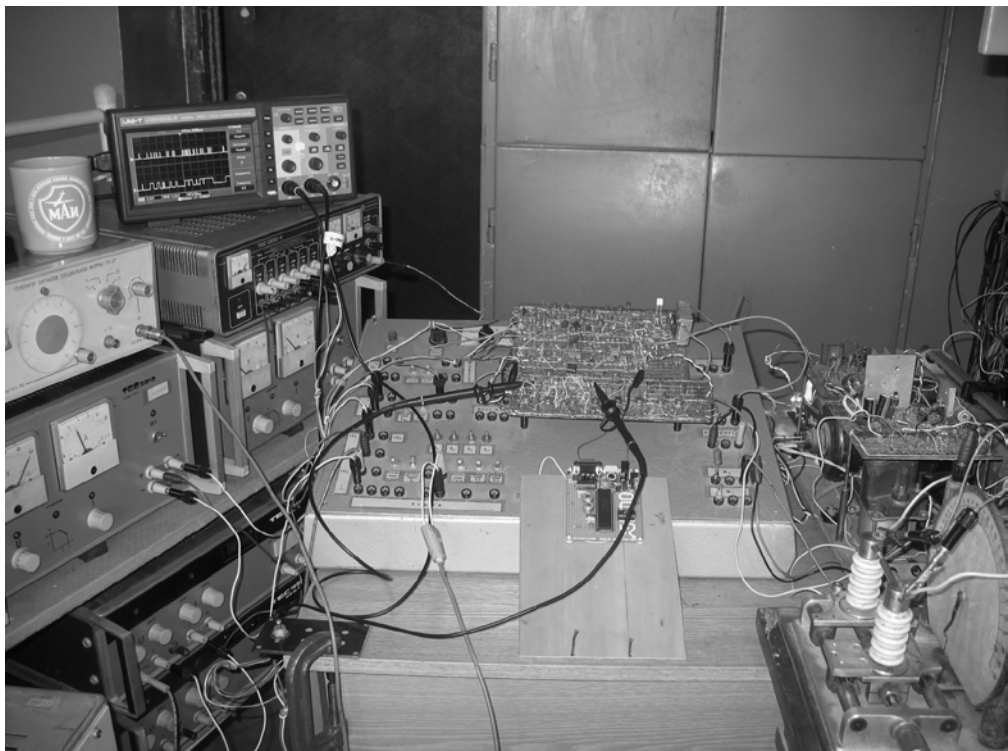


Рис. 11. Фотография рабочего места.



Разработаны функциональные схемы, компьютерные модели аналогово-цифровых ИД, построенных по критерию наличия хаоса в пульсациях тока дуги, для цепей с нерегулируемыми R и RC нагрузками. Работоспособность ИД подтверждена моделированием и испытаниями на лабораторном стенде.

Исследованы компьютерные модели и лабораторные макеты ИД, построенных по критериям рекурсии, наличию «фликкер-эффекта» и резкому падению тока в начальной фазе дуги. Для каждого из рассмотренных ИД определены ограничения, затрудняющие их применение в качестве единственного средства индикации последовательной дуги.

Отмечено и экспериментально подтверждено, что общим ограничением на все методы индикации дуги по её характерным признакам, является их восприимчивость к электромагнитным помехам из цепей, несущих аварийные дуговые разряды, что может вызвать массовые отключения исправных фидеров и катастрофические ситуации в СЭС.

**В пятой главе** изложены результаты исследований и разработки методов индикации аварийных дуговых разрядов последовательного типа, основанных на возникновении в нагрузках изменений их параметров, нетипичных для нормальных процессов.

Разработаны функциональные схемы, аналоговые и аналого-цифровые компьютерные модели ИД последовательного типа, построенные по принципу контроля за токами в цепях с RL и резистивными нерегулируемыми нагрузками, а также в цепях с ИВЭ РЭА постоянной мощности и вентиляторами на шаговых электродвигателях. В вариантах ИД использованы динамические аналоговые модели нагрузок, либо их вольтамперные характеристики, а также узлы «выборки-хранения» для отслеживания медленных изменений номинальных токов (рис. 12).

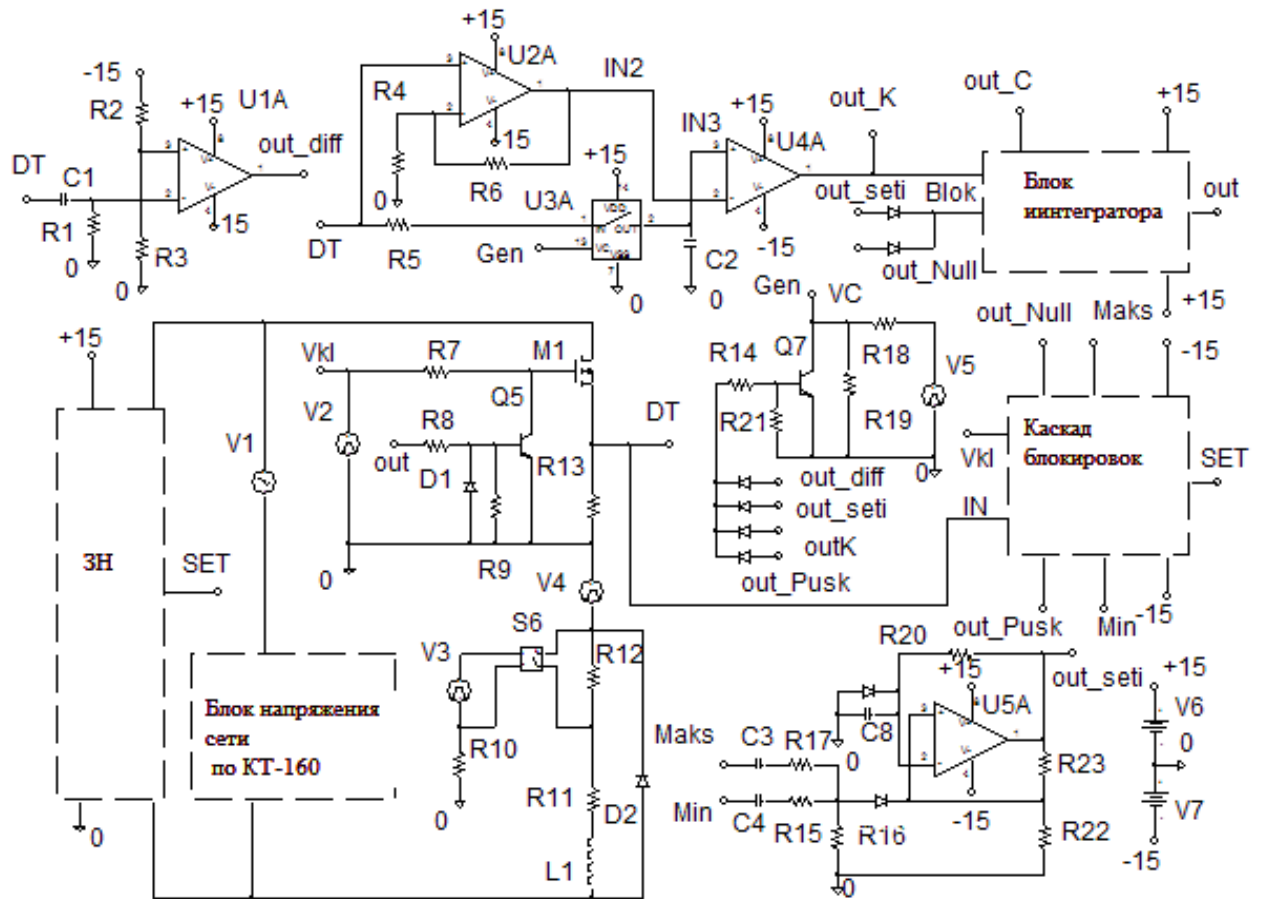


Рис. 12. Компьютерная модель ИД с VBX для цепей с  $RL$  нагрузками.

Работоспособность ИД подтверждена моделированием и испытаниями лабораторных макетов (рис. 13).

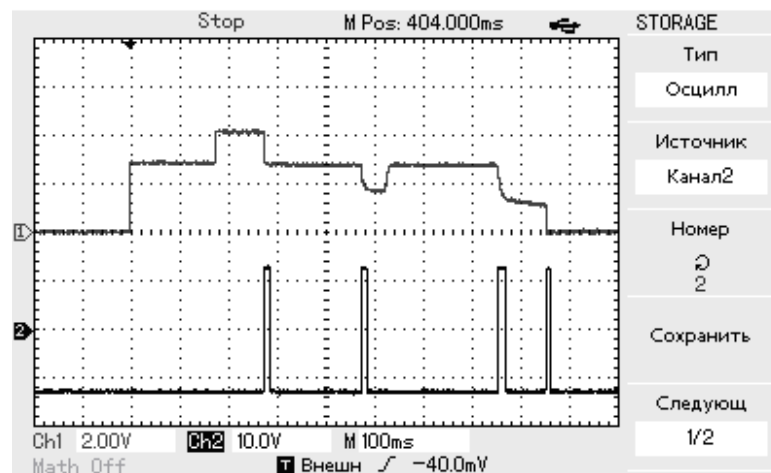


Рис. 13. Осциллограммы процессов ликвидации дуги в лабораторном макете: ток нагрузки и напряжение с выхода дифференцирующего каскада.

Разработаны функциональные схемы, аналоговые и аналого-цифровые компьютерные модели ИД, построенные по принципам контроля за характерными параметрами нагрузок, описывающих их энергетические

состояния, но не связанные со средними токами: регулируемых устройств освещения и обогрева, КДПТ с постоянными моментами на валу, а также прерывистых дуговых разрядов. Работоспособность ИД подтверждена моделированием и испытаниями лабораторных макетов.

Определено техническое содержание ИД, универсальных к набору нагрузок в низковольтных авиационных сетях постоянного тока и построенных на основе аналоговых БМК, либо с применением аналоговых узлов в сочетании с цифровыми микроконтроллерами.

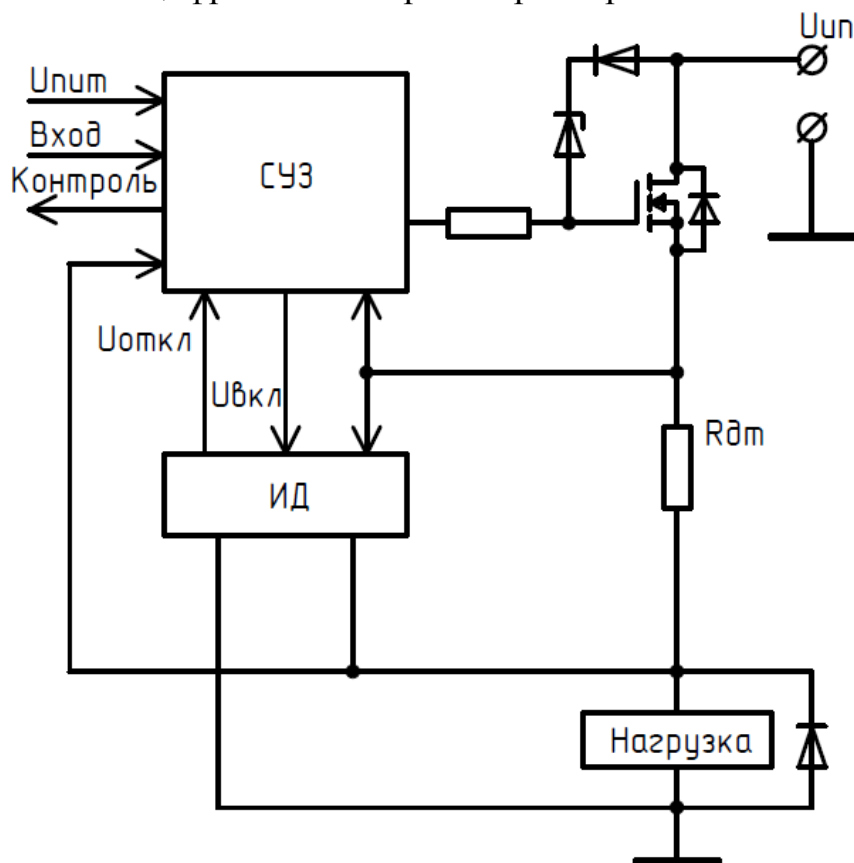


Рис. 14. Функциональная схема АЗК с индикатором дуги

Любой из разработанных универсальных ИД является дополнением к схемам управления транзисторных аппаратов защиты и коммутации (рис. 14).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие научные и практические результаты:

1. Исследованы и разработаны электронные устройства нового типа, предназначенные для индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в авиационных низковольтных электросетях постоянного тока,

сформированные как дополнение к транзисторным аппаратам коммутации и защиты.

2. Предложены метод ликвидации параллельной дуги в низковольтных авиационных электросетях постоянного тока, а также средство его реализации, основанные на способности транзисторных аппаратов защиты к амплитудному ограничению аварийных токов.

3. Разработаны и изготовлены портативные стенды для экспериментальных исследований характерных свойств аварийной дуги последовательного типа в установившемся и прерывистом режимах.

4. В ходе экспериментов пополнены сведения о свойствах последовательной низковольтной дуги. Установлена малая вероятность возникновения дуги в цепях с КДПТ и ИВЭ РЭА. Обнаружены пологие экстремумы на вольтамперных характеристиках дуги при малых зазорах. Установлена непропорциональность размаха пульсаций тока дуги её среднему значению. Показана возможность использования факта уменьшения среднего тока в цепи с возникшей дугой в качестве её индикатора.

5. Дана оценка применимости в авиационных условиях методов ликвидации последовательной дуги, основанных на индикации её характерных признаков. При этом разработаны и исследованы функциональные схемы, компьютерные модели и лабораторные макеты индикаторов дуги по уровню её шума, хаотичности его параметров, рекурсивности дуги и др. Показано, что для каждого из рассмотренных вариантов существуют ограничения, исключающие их универсальность, а общим ограничением является чувствительность к электромагнитным помехам из аварийных цепей.

6. Разработаны методы, функциональные схемы, компьютерные модели и лабораторные макеты индикаторов последовательной дуги, построенные по принципу мониторинга за аварийными изменениями энергетических параметров в цепях типовых нагрузок авиационных низковольтных систем постоянного тока. Разработано, исследовано и испытано с положительными результатами универсальное устройство индикации последовательной дуги как дополнения к транзисторному аппарату защиты.

**Публикации по теме диссертации.****Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК**

1. Е.В. Машуков, К.В. Куликовский, Г.М. Ульященко, Д.А. Шевцов. Проблемы ликвидации аварийных дуговых разрядов в авиационных системах электроснабжения. // Практическая силовая электроника, 2013, №4(52), С.17-20.
2. Е.В. Машуков, К.В. Куликовский, Г.М. Ульященко, Д.А. Шевцов. Методы ликвидации параллельной дуги в авиационных системах электроснабжения постоянного тока. // Практическая силовая электроника, 2014, №1(53), С.2-5.
3. Е.В. Машуков, Г.М. Ульященко, К.В. Куликовский. Исследования аварийных дуговых разрядов последовательного типа в авиационных сетях постоянного тока. // Практическая силовая электроника, 2014, №2(54), С.11-15.
4. Е.В. Машуков, К.В. Куликовский, Г.М. Ульященко. Методы индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в системах электроснабжения. // Практическая силовая электроника, 2014, №3(55), С.23-27.
5. Е.В. Машуков, Г.М. Ульященко, К.В. Куликовский. Эффективность методов индикации аварийных дуговых разрядов в авиационных системах постоянного тока. // Практическая силовая электроника, 2014, №4(56), С.41-44.
6. Е.В. Машуков, Г.М. Ульященко, Д.А. Шевцов, К.В. Куликовский. Индикация последовательной аварийной дуги в авиационных системах постоянного тока с использованием аналоговых моделей нагрузок.// Практическая силовая электроника, 2015, №4(60), С.13-16.
7. Е.В. Машуков, Г.М. Ульященко, Д.А. Шевцов, К.В. Куликовский. Индикация последовательной аварийной дуги в авиационных системах постоянного тока с использованием вольтамперных характеристик нагрузок. // Практическая силовая электроника, 2016, №1(61), С.47-52.

**Личный вклад автора** в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в следующем: на основе ряда публикаций, приведенных в [1] определены возможные причины и отдельные условия возникновения аварийных дуговых разрядов применительно к авиационным системам электроснабжения. В [2] проведено моделирование в среде OrCAD разработанного алгоритма индикации и ликвидации аварийного дугового разряда параллельного типа, а также его апробация на натурном макете. В [3] проведены эксперименты по лабораторному исследованию реальных

дуговых разрядов последовательного типа, разработаны и изготовлены стенды для их проведения. На основе публикаций, приведенных в [4] разработана классификация существующих методов индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в различных системах электроснабжения. В [5], на основе разработанной классификации, проработана возможность применения ряда существующих алгоритмов, применительно к особенностям эксплуатации в условиях авиационных СЭС, проведены натурные лабораторные эксперименты некоторых алгоритмов. В [6,7] проведено моделирование в среде OrCAD разработанных алгоритмов индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов последовательного типа, построены макеты для натурального моделирования разработанных алгоритмов в условиях напряжения сети с параметрами, соответствующими требованиям технического руководства КТ-160.