

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**



*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»

ДИССЕРТАЦИЯ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный руководитель:  
Профессор, д.т.н. Машуков Е.В.

МОСКВА – 2016

## Оглавление

Введение.....	5
<b>Глава 1. Анализ способов индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых системах электропитания.....</b>	<b>14</b>
1.1 Классификация результатов исследований.....	14
1.2 Характер исследований.....	16
1.3 Объекты исследований.....	18
1.4 Степень изменений в системах распределения энергии.....	19
1.5 Физические основы методов.....	22
1.6 Универсальность к роду тока и характеру дуги.....	22
1.7 Места размещения средств защиты.....	22
1.8 Характерные электрические признаки аварийных дуговых процессов	23
1.8.1 Уровень пульсаций тока в фидере.....	24
1.8.2 Наличие широкополосного шума.....	26
1.8.3 Нерегулярные изменения электрических параметров шума.....	28
1.8.4 Комплекс признаков.....	30
1.9 Сравнение нормальных и аварийных процессов.....	32
Выводы по главе 1.....	34
<b>Глава 2. Методы ликвидации параллельной дуги в авиационных системах электроснабжения постоянного тока.....</b>	<b>37</b>
2.1 Методы ликвидации параллельной дуги средствами транзисторных АЗК.....	37
2.2 Моделирование АЗК с функцией ликвидации параллельной дуги.....	38
Выводы по главе 2.....	45
<b>Глава 3. Исследование свойств последовательной дуги в авиационных низковольтных сетях постоянного тока.....</b>	<b>46</b>
3.1 Возникновение и развитие дуговых разрядов.....	46
3.2 Прерывистая последовательная дуга.....	52
3.3 Вольтамперная характеристика дуги.....	58

3.4	Исследование пульсаций тока дуги.....	64
	Выводы по главе 3.....	76
<b>Глава 4. Индикация дуги последовательного типа по её характерным свойствам.....</b>		
		79
4.1	Свойства низковольтных авиационных электросетей и потребителей их энергии.....	79
4.2	Характерные признаки последовательной дуги. Методы её индикации по этим признакам.....	86
4.2.1	Уровень шума тока дуги.....	86
4.2.2	Прямое измерение размаха пульсаций тока дуги цифровым методом.....	93
4.2.3	Наличие шума дуги в широкой полосе частот.....	94
4.2.4	Пульсации напряжения на дуге.....	95
4.2.5	Резкое падение тока в начальной стадии дуги.....	96
4.2.6	Рекурсивность дуги.....	98
4.2.7	Наличие «фликкер-эффекта».....	99
4.2.8	Непрерывность спектров дуги.....	100
4.2.9	Индикация хаотичности в пульсациях тока дуги.....	102
4.3	Методы борьбы с перекрёстными наводками от дуги.....	107
	Выводы по главе 4.....	110
<b>Глава 5. Индикация последовательной дуги по отклонениям от нормальных процессов.....</b>		
		112
5.1	Индикация дуги в цепях с индуктивно-активными нагрузками.....	112
5.1.1	Использование аналоговых моделей нагрузок.....	113
5.1.2	Контроль за изменением средних значений токов.....	120
5.1.3	Блокировка индикации дуги при плавных неаварийных изменениях тока нагрузки.....	123
5.2	Индикация дуги в цепях с резистивными нагрузками.....	128
5.2.1	Нерегулируемые резистивные нагрузки.....	128

5.2.2	Регулируемые нагрузки с ШИМ – управлением.....	131
5.3	Индикация дуги по характерным свойствам нагрузок.....	133
5.3.1	ИВЭ РЭА с постоянной выходной мощностью.....	133
5.3.2	ИВЭ РЭА с дискретно изменяющейся выходной мощностью...136	
5.3.3	Импульсно-периодические нагрузки.....	137
5.3.4	Коллекторные электродвигатели постоянного тока.....	140
5.3.5	Индикация прерывистой последовательной дуги.....	142
5.3.6	Устройство индикации последовательной дуги в цепях с заданными типовыми нагрузками.....	143
5.4	Аппаратурная реализация индикаторов последовательной дуги.....	145
	Выводы по главе 5.....	147
	<b>Заключение.....</b>	<b>148</b>
	<b>Список сокращений и условных обозначений.....</b>	<b>150</b>
	<b>Библиографический список.....</b>	<b>152</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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 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.

Задача усложняется ещё и тем, что дополнение сложившихся систем защиты распределительных сетей средствами по ликвидации дуговых разрядов должно ограничиваться рамками модернизации и не требовать коренных, затратных изменений.

Возможные причины возникновения аварийных дуговых разрядов можно обобщить следующим образом:

- повреждение изоляции провода трением о соседние провода в жгуте, либо о детали крепления жгута с последующим замыканием на корпус;
- разрушение изоляции провода с последующим её обугливанием в результате разогрева от утечки тока;
- ослабление электрических контактов в местах болтовых креплений проводов;
- излом жилы провода;
- обрыва провода с последующим замыканием его неизолированного конца на корпус самолёта.

По схеме аварии дуга может быть последовательной или параллельной.

Последовательная дуга возникает в месте разрыва последовательного электрического контура, образованного источником электропитания, коммутационно-защитными аппаратами и нагрузкой. В связи с наличием напряжения на горящей дуге, ток в повреждённой цепи в большинстве случаев уменьшается относительно предшествовавшего неаварийного уровня и традиционная защита от перегрузок по току не срабатывает.

Параллельная дуга возникает вследствие сильной утечки тока на корпус вплоть до тока короткого замыкания. Такая дуга может возникнуть как с отрывом провода от нагрузки, так и параллельно нагрузке. Условием появления дуги должен быть факт размыкания цепи, что приводит к разогреву образовавшего места касания с последующей ионизацией промежутка. При «глухом» (металлическом) коротком замыкании дуга не возникает, а сама авария ликвидируется максимальной токовой защитой. Но если короткое замыкание неустойчиво вследствие, например, вибрации корпуса и провода, то дуга возникает, а ток в дуге может оказаться недостаточным для срабатывания традиционной защиты, а область, в которой возможно возникновение дуги, окажется расположенной ниже время-токовой характеристики аппарата защиты и коммутации.

Уменьшить вероятность аварий, вызванных электрическими дугами, позволяют следующие способы.

1. Повышение механической и диэлектрической прочности изоляции проводов. На этом пути авиационные провода, применяемые, например, на самолётах компании «Boeing», неоднократно меняли тип изоляции в промежутке 1970...2010 годов от «PVL/Nylon» до современных «Tefzel» и «Teflon-Karton». Однако необходимость борьбы с дугами сохранилась.

2. Непрерывный мониторинг утечки тока через изоляцию провода. Такой метод широко применяется на космических аппаратах. Однако он требует введение специальных, распределённых по длине провода, датчиков утечки, либо создания аппаратуры дистанционной локализации. И то и другое трудно внедрить в существующие системы.

3. Методы, уменьшающие вероятность возникновения дуги. К ним относится, например, предложение прокладывать фидеры нагрузок параллельными проводами, суммарное сечение которых равно сечению одиночного провода, причём каждый из проводов должен закрепляться в отдельной точке. При обрыве любого провода оставшиеся провода зашунтируют место разрыва и последовательной дуги не возникнет. Способ требует переделки распределительных сетей и нагрузок. Отметим также, что вероятность возникновения параллельной дуги возрастёт.

4. Разработка электронных средств защиты от дуги в качестве дополнения существующей контактной или бесконтактной 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). Подобные средства защиты могут также входить в состав территориальных электронных центров управления электрическими нагрузками (ЦУН), которые в зарубежной литературе обозначаются как SPDU (Secondary Power Distribution Unit), либо как MCPCB (Multi-Channel Power Controller Board). Данный метод вызывает интерес как наименее затратный и ему уделяется основное внимание в рамках данной диссертации.

Фундаментальные сведения о свойствах дуговых разрядов в газах и вакууме можно почерпнуть из работ И.А. Капцова. Условия образования дуговых разрядов в авиационных системах зажигания исследованы проф. Ю.А. Поповым. Разработке транзисторной коммутационно-защитной аппаратуры для авиационных систем распределения электроэнергии посвящены работы Е.В. Машукова, Д.А. Шевцова, Г.М. Ульященко, С.Б. Резникова, Ю.В. Ермилова. Первенство в исследованиях и разработке методов индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов следует отдать зарубежным авторам: J. Beck, B. Diong, J. Hastings, J. Jonson, S. Liao, M. Kruger, D. Nemir, R. Pappas, T. Potter, G. Scott и др.



Подавляющее число 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.

Имеющиеся 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, как не имеющих функциональных наземных прототипов, содержащих разветвлённые структуры и весьма разнообразные электрические нагрузки.

**Цель работы.** Разработка методов защиты авиационных низковольтных электросистем постоянного тока от аварийных дуговых разрядов; разработка средств технической реализации этих методов в виде транзисторных устройств защиты от перегрузок по току с дополнительными функциями индикации и ликвидации аварийных дуговых 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 и 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 системах распределения постоянного тока с типовыми нагрузками таких систем.

**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.

#### **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. 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 ценность.**

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.

### **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. Ульященко, Д.А. Шевцов. –М.: Изд-во МАИ, 2016. – 160 с.

### **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 Мин. Обр. и Н. РФ

### **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.

### **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.

## ГЛАВА 1

### **Анализ способов индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых системах электропитания.**

#### ***1.1. Классификация результатов исследований.***

Основная часть полезной информации о результатах исследования параметров аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых системах электропитания, а также о поисках методов их индикации и ликвидации содержится в обзорах, научно-технических статьях, патентной литературе, технических отчётах и немногочисленных фундаментальных научных трудах, опубликованных в открытой печати начиная с 1992...1994 годов и по настоящее время.

Анализ результатов исследований позволяет предложить следующую их классификацию по нескольким основным критериям.

#### По характеру исследований:

- технические обзоры;
- теоретические и экспериментальные исследования свойств дуги с публикацией результатов в виде научно-технических статей;
- разработки методов индикации и ликвидации дуги, а также технических средств их реализации с публикацией в патентной форме;
- результаты испытаний технических средств индикации и ликвидации дуги с публикацией в форме отчётов;
- нормативные материалы на средства защиты от дуги и на методы их испытаний;
- обобщающие фундаментальные работы диссертационного характера.

По назначению объектов, имеющих сети распределения электроэнергии (СРЭ) в качестве места возможного возникновения аварийных дуговых разрядов:

- жилые и промышленные наземные сооружения с сетями переменного тока;
- жилые и технические наземные сооружения, питаемые переменным промышленным напряжением через инверторы от солнечных батарей с напряжением 270 В постоянного тока;
- перспективные автомобильные системы электрооборудования с повышенным напряжением 36...42 В постоянного тока;
- авиационные системы электропитания переменного тока 115/200 В, 400...800 Гц и системы постоянного тока с традиционным напряжением 27...28,5 В и перспективным напряжением 270 В;
- системы электропитания космических станций с напряжением 270 В постоянного тока.

По глубине изменений, вносимых средствами защиты от дуги в традиционные (исходные) системы распределения электроэнергии:

- с коренными изменениями структуры СРЭ;
- с частичными их изменениями;
- без существенных изменений.

По физическим основам способов индикации:

оптические; тепловые; электромагнитные; электрические.

По степени универсальности к роду тока СЭС:

для систем переменного тока; для систем постоянного тока; универсальные.

По виду дуговых разрядов:

для индикации параллельных разрядов; для индикации последовательных разрядов; универсальные.

По месту размещения средств защиты в составе СРЭ:

- децентрализованные, в составе аппаратов защиты от токовых перегрузок;
- централизованные, в составе центров управления электрическими нагрузками.

По признакам, лежащим в основе методов индикации:

- по характерным особенностям дуги;
- с использованием библиотеки неаварийных процессов в цепях питания нагрузок;
- комбинированные.

Проанализируем приведённую выше классификацию более детально, иллюстрируя анализ ссылками на техническую литературу.

### ***1.2. Характер исследований.***

Технические обзоры, как правило, содержат обоснование актуальности проблемы, примеры возникновения дуги по тем или иным причинам, основные проблемы её индикации и ликвидации в различных по назначению системах электропитания, возможные пути решения этих проблем без технических подробностей [1-4, 41].

В научно-технических статьях по защите от аварийных дуговых разрядов освещаются следующие вопросы [5-31, 42-45]:

- временные, частотные и энергетические параметры дуги;
- математическое моделирование дуговых процессов;
- техника экспериментальных исследований;
- теоретическое и экспериментальное обоснование методов индикации дуги;
- опыт применения разработанных методов ликвидации дуги в конкретных электрических системах;
- методы дистанционного обнаружения мест повреждения проводов после срабатывания средств быстродействующей защиты от дуги;
- технические описания промышленных образцов аппаратов защиты от дуги.

Основная часть теоретических исследований выполнена сотрудниками технических университетов США, Германии, Франции, Китая, Кореи в содружестве с представителями промышленных предприятий, занимающихся разработками средств защиты от дуги.



Методы индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов, а также технические средства их реализации и алгоритмы работы содержатся в многочисленных патентах и заявках на патентование, основные из которых рассматриваются ниже. Авторство большей части патентов принадлежит сотрудникам фирм, занимающихся разработкой систем электропитания и агрегатов для этих систем (Siemens Energy & Automation Inc., General Electric, LEONI Bordnetz-Systeme, Hella KGaA Hueck & Co, Hamilton Sundstrand Corp., Honeywell Inc.), либо разработкой коммутационно-защитной аппаратуры – контактной (Klixon, Eaton Corp.) и бесконтактной (Amethek, National Hybrid, Leach). Часть патентов получена сотрудниками многопрофильных фирм (Square D; Pass & Seymour; X-L Synergy).

Отчёты об испытаниях средств защиты от дуги, опубликованные в доступной литературе, немногочисленны. Здесь следует упомянуть отчёт [32] об успешных испытаниях однофазного аппарата защиты фирмы Eaton Corp. от дуги в авиационной системе переменного тока 115 В, 400 Гц на борту летающей лаборатории Boeing 727-25С в течение 120 часов полёта (в составе оборудования, отказ которого не влияет на безопасность полёта), а также краткие сведения о лабораторных испытаниях устройств защиты в составе моделирующих стендов автомобильных систем электропитания [21].

К нормативным материалам на средства защиты от дуги можно отнести стандарт UL 1999 США, определяющий программу испытаний таких средств [33].

В опубликованных научных исследованиях диссертационного характера:

- анализируются возможные методы индикации дуги в автомобильных СЭС и при этом отдаётся предпочтение радиотехническому способу её обнаружения [34];
- рассматриваются методы индикации дуги в промышленных трёхфазных системах электропитания и выбирается способ

обнаружения аварий, основанный на мониторинге действующих значений токов [35];

- рассматриваются возможности применения математических методов «быстрого преобразования Фурье» и «вейвлет-преобразования» для индикации аварийной дуги на фоне неаварийных процессов в промышленных системах переменного тока [36];
- рассматриваются возможности идентификации аварийных дуговых разрядов с высоким импедансом в высоковольтных промышленных сетях с использованием математических моделей дуги [37].

### ***1.3. Объекты исследования.***

Наиболее полно средства защиты от аварийных дуговых разрядов развиты в системах электропитания переменным током жилых и промышленных наземных комплексов, что объясняется большим числом аварийных возгораний, вызванных электрическими разрядами (по данным [12] в жилых и промышленных зданиях США в 2006 году имело место 67800 случаев возгорания с 485 погибшими и общим ущербом в 868 миллионов долларов). В связи с этим в дополнение к традиционным тепловым и электромагнитным способам защиты фидеров от токовых перегрузок в США в 1994...1996 годах была разработана и принята в эксплуатацию технология AFCI (Arc-Fault Circuit Interrupter) [38, 39], основанная на мониторинге и анализе электронными средствами параметров текущего тока фидера, вычислении первой производной тока, подсчёте импульсов  $dI/dt$  в пределах каждого из нескольких полупериодов и установления факта неравномерности распределения количества импульсов по временным отрезкам. В феврале 1999 года в США был издан стандарт UL 1999, содержащий описания контрольных тестов, предназначенных для проверки устройств индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов (всего 75 разнообразных тестов, проверяющих надёжность срабатывания в аварийных режимах и отсутствие

ложных срабатываний при работе с неповреждёнными фидерами, питающими нагрузки различного характера).

В последующие годы были предприняты попытки использовать технологию AFCI в других системах: электропитания жилых и промышленных объектов переменным током с первичными источниками в виде солнечных батарей с выходным напряжением 270 В постоянного тока, в перспективных автомобильных СЭС постоянного тока с повышенным напряжением 36...42 В; в авиационных системах переменного тока постоянной частоты 115/200 В 400 Гц, переменного тока переменной частоты 360...800 Гц, традиционных системах постоянного тока с напряжением 27...28,5 В и в перспективных СЭС постоянного тока с напряжением 270 В. Однако в процессе внедрения возникли трудности: в автомобильных и авиационных системах постоянного тока – из-за отсутствия обратных проводов и возможности применить дифференциальную защиту; в авиационных системах постоянного и переменного тока из-за значительных шумовых помех от соседних проводов в жгутах, от источников питания и импульсно-периодических нагрузок, что затрудняет индикацию дуги по её шуму, в разветвлённых силовых цепях солнечной энергоустановок – ввиду ложных срабатываний защиты в неаварийных ветвях от паразитных наводок из повреждённых участков.

В связи с этим разработка эффективных методов защиты от аварийных дуговых разрядов в перечисленных системах продолжается.

#### ***1.4. Степень изменений в структуре СРЭ.***

Коренные изменения структуры СРЭ предполагают введение в неё дополнительных агрегатов, либо электрических связей, обеспечивающих максимальную достоверность индикации дуги. Характерной иллюстрацией к подобным изменениям служит заявка США № US 2008/129307 (Honeywell Inc.), в которой предлагается снабдить все электрические нагрузки систем (в первую очередь авиационных) дополнительными электронными блоками диагностики напряжений их питания и токов, потребляемых нагрузками по

цепям питания. В сочетании с информацией о выходных напряжениях и токах электронных аппаратов защиты и коммутации (АЗК, SSPC) это даёт возможность обеспечить дифференциальность защиты и достоверно обнаруживать параллельные дуги по разности токов, а последовательные – по разности напряжений в начале и в конце фидеров.

Практически аналогичное предложение сформулировано в документе BRD № DE 10132952 A1 (LEONI Bordnetz-Systeme, 2003), где для индикации последовательной дуги в автомобильных DC (direct current) системах предлагается вводить специальные измерительные блоки на входах нагрузок. В заявках № US 2001/0029433 (Square D, 2001), № DE 4316239 (1994) и № WO 03/007450 (DAIMLERCHRYSLER, 2003) для обнаружения последовательных дуг в автомобильных DC системах постоянного тока предлагается прокладывать дополнительные сигнальные провода к нагрузкам. В патенте № EP 13000919 A1 (LEONI Bordnetz-Systeme, 2003) предложено расщеплять фидеры к нагрузкам автомобильных DC систем на параллельные провода, что исключает саму возможность возникновения последовательных дуг при разрыве любого из проводов (отметим, что вероятность возникновения параллельных дуг при этом возрастает). В заявке BRD № DE 10 2004 048320 (Robert Bosch, 2006) предлагается непрерывно на частоте в единицы герц коммутировать нагрузки автомобильных DC систем полупроводниковыми ключами, входящими в SSPC, с паузами между импульсами, достаточными для деионизации последовательной дуги в том случае, если она возникнет. После деионизации дуги образовавшийся разрыв провода прервёт ток, что и послужит индикацией ликвидированной дуги (отметим, что подобный режим постоянных переключений индуктивных нагрузок вызовет перенапряжения и дополнительные тепловые потери в SSPC, а также помехи по цепям электропитания).

Рассмотренные коренные изменения в структуре СРЭ неприемлемы в бортовых сетях объектов, находящихся в эксплуатации. Однако на перспективных летательных аппаратах (ЛА), проектируемых с требованием

глубокой диагностики режимов всех нагрузок, тех сведений о состоянии нагрузок, которые поступают в процессор ЦУН, возможно окажется достаточно для диагностики дуговых разрядов. В таком случае эти разряды могут быть ликвидированы коммутацией SSPC, т.е. без дополнительных средств защиты от дуги.

Частичные изменения в СРЭ подразумевают модернизацию существующей коммутационно-защитной аппаратуры (КЗА) с целью введения в неё функций защиты от дуги, основанной на диагностике изменений, возникающих в существующей системе. Модернизации может быть подвергнута как традиционная тепловая аппаратура путём введения в неё электронных блоков защиты от дуги, так и электронная защитная аппаратура класса SSPC, что более естественно. Предложения объединить в одном устройстве функции SSPC и защиты от дуги содержатся в документах № WO 2004/073131 (Honeywell, 2004) и BRD № DE 10 2004 056868 A1 (Hella KGaA Hueck & Co, 20006).

Максимальной задачей разработчиков новой аппаратуры защиты является обеспечение небольших изменений в размерах и массе КЗА и исключение необходимости перекомпоновки распределительных устройств СРЭ. В качестве примеров технической реализации подобных разработок можно назвать «гибридные» изделия фирм «Klixon» и «Eaton» [23, 28], в которых электронные блоки защиты от дуги конструктивно объединены с традиционными тепловыми аппаратами защиты от перегрузок по току. Полностью электронными являются устройства фирм «Amethek» и «National Hybrid», в которых каскады защиты от дуги конструктивно объединены с транзисторными аппаратами защиты от токовых перегрузок [18, 29]. В дальнейшем мы будем анализировать методы индикации и ликвидации дуги, реализуемые без коренных изменений СРЭ.

Появление в составе систем распределения электроэнергии дополнительных средств защиты от дуги вызывает и дополнительные проблемы. Одной из них является трудность обнаружения места аварии,

поскольку быстродействующая электронная защита не позволяет развиваться процессам катастрофического разрушения электрических цепей и внешние признаки аварии могут отсутствовать. Поэтому интенсивно разрабатываются специальные средства обнаружения мест повреждений, ликвидированных быстродействующей защитой, основанные на принципах дефектоскопии электрических цепей [24-27].

Другой проблемой является возможность уменьшения надёжности систем электропитания против расчётных значений из-за конечной вероятности ложных срабатываний средств защиты от дуги.

### ***1.5. Физические основы методов.***

Оптические, тепловые и электромагнитные методы индикации дуги основаны на обнаружении световых, тепловых и электромагнитных излучений в местах образования дуговых разрядов. В силу большой протяжённости, разветвлённости и труднодоступности авиационных электрических сетей перечисленные методы требуют большого количества датчиков и дополнительных связей от этих датчиков, что по сути, равнозначно коренной модернизации систем. Поэтому ниже мы будем рассматривать только электрические методы индикации, основанные на результатах мониторинга и анализа токов в фидерах.

### ***1.6. Универсальность к роду тока и к характеру дуги.***

Эти качества предлагаемых методов обеспечиваются ценой усложнения их алгоритмов, поскольку здесь используются только те признаки дуги, которые являются общими для цепей постоянного и переменного токов или для параллельной и последовательной дуг.

### ***1.7. Места размещения средств защиты.***

В традиционных СРЭ с контактной КЗА средства защиты от аварийный дуговых разрядов предполагается размещать внутри модернизированных тепловых аппаратов защиты от токовых перегрузок, которые в авиационных системах в свою очередь группируются в распределительных коробках. В перспективных системах с бесконтактной КЗА средства защиты от дуги

могут дополнять бесконтактные аппараты защиты и коммутации, либо входить в состав многоканальных централизованных устройств управления нагрузками. В последнем варианте появляется возможность реализации достоверных (хотя и сложных) алгоритмов индикации дуги за счёт мощных вычислительных средств, входящих в ЦУН [20]. При размещении средств индикации дуги в составе АЗК возникает противоречие между задачей миниатюризации АЗК и необходимостью размещения в нём относительно больших по размерам микропроцессоров (МП).

### ***1.8. Характерные электрические признаки аварийных дуговых процессов.***

Электрические дуговые разряды – это хорошо изученное явление и поэтому большинство практических методов их обнаружения основано на характерных её проявлениях (первая группа методов). В их числе: наличие широкополосного «розового» шума, рекурсивность процессов протекания тока, хаотичность изменения параметров шума, наличие «фликкер-эффекта», наличие искажений в форме кривой тока. Методы, основанные на использовании перечисленных признаков дуги, универсальны по отношению к роду тока и к виду дуги. Недостатком этих методов является возможность ложных срабатываний защиты при наличии неаварийных процессов, схожих с дугой. Характерным примером являются пульсации токов в цепях с коллекторными электродвигателями при возникновении неаварийных дуговых процессов в щёточно-коллекторных узлах.

Вторая группа методов основана на сравнении нормальных (эталонных) процессов в неаварийных фидерах с процессами в аварийных состояниях. Для реализации этих методов необходимо знание электрических моделей цепей питания нагрузок. Отсутствие таких моделей в нормативных описаниях нагрузок составляет основную трудность применения данного метода. Получить необходимые сведения о нагрузках представляется возможным только в результате факторных экспериментов на испытательных стендах, укомплектованных реальными агрегатами систем

электрооборудования. Достоинством метода является отсутствие необходимости в анализах параметров дуги, зависящих от многих факторов: характера нагрузок, материала и массы электродов и др. Недостатки метода: отсутствие универсальности к нагрузкам, необходимость индивидуальных настроек (программирования средств защиты), необходимость учёта возможных изменений параметров нагрузок. Отметим всё же, что при системном проектировании эти недостатки вполне преодолимы.

Проиллюстрируем технические предложения по реализации методов обнаружения и ликвидации дуги, основанные на индикации её характерных признаков (в английских текстах применяется слово «signature» – подпись).

#### *1.8.1. Уровень пульсаций тока в фидере.*

Этот критерий наличия дуги в качестве единственного её признака использовался на ранних стадиях исследований. В патенте США № US 5359293 (Bell Communications, 1994) предлагается система обнаружения дуги в телекоммуникационных линиях путём сравнения уровня пульсаций тока дуги с эталонным неаварийным уровнем в диапазоне частот 4 Гц...5 кГц. В патенте США № US 6229679 (2001) описано простое устройство обнаружения дуги переменного тока в однофазных сетях с частотой 60 Гц по уровню шума с компаратором на диаке. В патенте США № US 6577138 B2 (Eaton Corp., 2003) приведена схема идентификации параллельной дуги в автомобильных системах постоянного тока, содержащая датчик тока, полосовой фильтр, выпрямитель, интегратор и микропроцессор. Наличие дуги обнаруживается по уровню шума и изменению среднего значения тока. В патенте США № US 6639768 B2 (Eaton Corp., 2003) описано устройство гашения дуги, нечувствительное к пульсациям в токе, потребляемым от промышленной сети регуляторами освещения. Действие устройства основано на сравнении текущих значений токов с двумя эталонными уровнями. В патенте США № US 6798628 (Pass & Seymour, 2004) приведена схема индикации параллельной и последовательной дуг в промышленных сетях с двумя уровнями настройки, двумя каналами фильтрации и МП. В канале



обнаружения последовательной дуги имеется задержка срабатывания защиты в одну секунду для исключения ложных срабатываний от неаварийных переходных процессов. В заявке США № US 2007/188947 A1 (Jordan & Hamburg LLP, 2007) приводится решение, направленное на улучшение достоверности обнаружения дуги в промышленных СЭС средствами AFCI на фоне помех от нагрузок и сети. Сигнал с датчика тока разделён на два канала: для слабых токов от последовательной дуги и для сильных токов от параллельной дуги. Сигналы усиливаются, выпрямляются, фильтруются и сравниваются с опорными уровнями. В заявке BRD № DE 10 2004 037193 A1 (Hella KGaA Hueck & Co) индикация дуги в автомобильной системе постоянного тока производится по отношению сигнал/шум и уровню тока. В полезной модели BRD № DE 20 2004 /020402 (Ellenberger) индикация дуги переменного тока в авиационных сетях основана на сравнении амплитудных уровней производных тока  $dI/dt$  в сигналах о токе в реальной и неаварийной системах. В заявке США № US 2010/0027176 (Sansata Technologies Massachusetts Inc.) описано устройство обнаружения дуги в системах переменного тока, содержащее компаратор опорного уровня, величина которого модулирована напряжением сети, что даёт возможность избежать ложных отключений при переходных процессах изменения напряжения сети. В статье [12] утверждается, что последовательную дугу в жилых помещениях при включении типовых бытовых нагрузок, или их комбинации можно обнаружить по возросшему отношению суммы действующих значений третьей, пятой, седьмой и девятой гармоник к действующему значению первой гармоники.

В заключение раздела отметим, что достоверность индикации дуги однокритериальным методом определения отношения сигнал/шум может быть достаточно высокой только при наличии рабочих сигналов, имеющих большой запас по отношению к неаварийным шумам в системах, гарантированных нормативными документами на эти системы.

### *1.8.2 Наличие широкополосного шума.*

Одним из самых ранних является патентный документ BRD № DE 4316239 (1994 год), где описана простая схема индикации дуги в однофазной сети по шуму в источнике электропитания в диапазоне частот 5,5...10,7 МГц. В патенте США № US 5223795 (индивидуальный автор, 1993) предлагается контролировать возникновение дуги по наличию высокочастотных шумов в пределах каждого из полупериодов сетевого напряжения. В патенте США № US 5835321 (Eaton Corp., 1998) защищено устройство, контролирующее ненормальный уровень шума в полосе частот 6...12 кГц. В патенте США № US 6088205 (Leviton Manufacturing, 2000) описано устройство обнаружения дуги в промышленных сетях переменного тока по среднеквадратичным значениям шума на двух частотах в/ч диапазона (400...500 кГц). Предложенное устройство дополняет технологию AFCI.

В патенте США № US 6259996 (Square D, 2001) описано устройство обнаружения дуги в промышленных сетях переменного тока по наличию шума на двух частотах среднечастотного диапазона (35 кГц и 70 кГц с возможным сравнением полученных сигналов по признаку наличия «фликкер-эффекта»). Данный патент открывает серию патентных документов фирмы «Square D», посвященных методам индикации аварийных дуговых разрядов сначала в промышленных, а затем и в бортовых авиационных системах. Характерен патент № US 7068480 A2 (Square D, 2006) с описанием устройства индикации дуги по её шуму на трёх частотах: 20 кГц, 33 кГц и 58 кГц. Описана специальная интегральная аналого-цифровая схема, обрабатывающая сигналы до входа в микропроцессор. Фильтры, выделяющие указанные частоты, выполнены на переключаемых конденсаторах.

Идея индикации дуги по её шуму на двух частотах реализована также в следующих патентных документах: заявке № US 2008/0204950 (Eaton Corp.), где для индикации выбран удалённый от влияния нагрузок диапазон частот 100...900 кГц; заявке BRD № DE 10318951 A1 (Hella KGaA Hueck & Co), где

последовательная дуга в автомобильных системах постоянного тока обнаруживается после обработки сигналов высокочастотной (1 МГц) и низкочастотной (1 кГц) частей спектра; заявке № US 2006/0171085 (Greenberg Traurig LLP), в которой дуга в промышленной сети между медными проводами обнаруживается с помощью двух фильтров на частотах 2 кГц и 6 кГц. Указывается, что в низкочастотной части спектра сигналы от дуги в наименьшей степени замаскированы помехами.

В заявке США № US 2004/0156153 (Honeywell Inc.) описано устройство обнаружения дуги в самолётных системах по признаку наличия шума на четырёх некротных частотах, выбранных в диапазоне 2...15 кГц (2 кГц, 3 кГц, 5 кГц и 7 кГц), который расположен выше максимально возможной частоты авиационных генераторов переменного тока (800 Гц). Одновременное присутствие шума на всех четырёх частотах при условии отсутствия шума в общей питающей сети и в проводах заземлений означает по мнению авторов наличие аварийной дуги.

В патенте США № US 6633824 B2 (Siemens Energy & Automation Inc.) предлагается для обнаружения аварийных дуговых разрядов в авиационных системах применить гетеродинный принцип измерения частоты.

Наиболее полно, идея обнаружения дуги по её шуму отражена в публикации [15] и в патенте № EP 1695425 B1 (Fachhochschule, Dortmund), полученном авторами публикации, где предлагается устройство сканирования частотного диапазона для сравнения полученного спектра со спектрами известных нагрузок и спектрами самолётной сети. Сканирование осуществляется с помощью аналоговых фильтров на переключаемых конденсаторах. Анализ результатов производится с помощью МП. Отметим, что предлагаемый принцип индикации по сути уже является комбинированным, поскольку он использует сведения о нагрузках. Все способы индикации дуги, описанные в предыдущих патентах, также в той или иной степени являются комбинированными, поскольку выбор частотных диапазонов для индикации дуги предполагает отсутствие в этих диапазонах

заметных естественных пульсаций от сети и нагрузок, что предполагает знание их свойств. Обратим внимание на разнообразие рекомендуемых частотных диапазонов, что указывает на многообразие условий применения, эквивалентных схем сетей и нагрузок. Таким образом, рассматриваемый критерий обнаружения дуги по наличию её шума в широком диапазоне частот, универсальный в принципе, требует частотных настроек в конкретных системах электропитания.

### *1.8.3. Нерегулярные изменения электрических параметров шума дуги.*

Одно из ранних технических предложений по анализу хаотических изменений параметров шума дуги содержится в патенте США № US 5933305 (Eaton Corp., 1999). Схема, объединяющая датчик тока, фильтр, выпрямитель и интегратор, запоминает и сравнивает средневыпрямленные значения нескольких полувольт тока в однофазной промышленной сети. При нескольких превышениях допустимой разницы следует отключение цепи (отметим, что такое устройство может ложно срабатывать в переходных режимах изменения токов). В патенте США № US 6300766 A1 (Eaton Corp., 2001) предлагается устройство, обнаруживающее хаотичность следования импульсов  $di/dt$  в сигналах о переменном токе. Сформированные сигналы подаются далее на входы двух инерционных каналов с разными постоянными времени. При нерегулярности следования импульсов схема формирует разностный сигнал, несущий информацию о наличии дуги. В заявке США № US 2002/0033701 A1 (WALL VARJAMA & BILINSKI, 2002) описано устройство индикации дуги в промышленных AC системах переменного тока (AC – alternating current), основанное на принципе сравнения среднеквадратичных значений положительных и отрицательных полувольт переменного тока. Похожая идея обнаружения хаоса в токе содержится в патенте США № US 6522509 (Eaton Corp., 2003), где поинтервально анализируется форма тока в авиационных AC системах 400 Гц и улавливаются хаотические изменения среднеквадратичных значений тока на интервалах. Вводятся запреты на срабатывания защиты при

включении моторных нагрузок и при питании выпрямительных устройств. В последнем случае речь идёт, по-видимому, о частотных искажениях формы токов.

Немало технических решений основано на обнаружении хаотичности во временной последовательности составляющих тока дуги. В патенте США № US 5280404 (Bio-Rad Laboratories Inc., 1994), заявке США № US 2001/0033469 A1 (WALL VARJAMA & BILINSKI, 2001) и в патенте США № US 6570392 (Pass & Seymour, 2003), приведены практические схемы, обнаруживающие дугу переменного тока путём анализа числа и расположения прямоугольных импульсов, сформированных из шума дуги. В патенте США № US 6943558 (Boeing, 2005) устройство индикации дуги в самолётной СЭС переменного тока основано на обнаружении хаотичности интервалов в шуме в диапазоне частот 2...4 кГц. Отметим, что в неаварийных режимах в этом диапазоне располагаются высшие гармоники основных частот переменного тока 360...800 Гц. В европейском патенте № EP 2482409 A2 (Hamilton Sundstrand Corp., 2005) запатентован транзисторный аппарат защиты, объединяющий защиту по току с функциями индикации и ликвидации параллельных и последовательных дуговых разрядов по факту хаотических изменений амплитуд и средних значений токов на интервалах измерений. В патенте США № US 7796366 B2 (Hamilton Sundstrand Corp., 2010) описано устройство обнаружения параллельных и последовательных дуг в цепях переменного тока. Программируемый модуль анализирует форму тока в фидере и идентифицирует параллельную дугу по признакам многократного и хаотичного пересечения мгновенными токами границ области сверхтоков в течении выделенного интервала времени. Последовательная дуга обнаруживается по признаку многократно повторяющихся отличий среднеквадратичных значений токов их эталонных уровней. В заявке США № US 2010/0085669 (General Electric, 2010) для индикации дуги в промышленных сетях анализируется шум тока в частотной области выше 60 Гц, где всплески тока чередуются с паузами. Формируется

последовательность прямоугольных импульсов, соответствующих всплескам. Расположение всплесков анализируется нечёткой логикой.

Интересная идея обнаружения дуги переменного тока содержится в заявках США № US 2006/0215335 и № US 2007/121496 (Honeywell, 2006, 2007), где наличие дуги устанавливается по форме фигур Лиссажу, сформированных сигналами о токе в фидере и о напряжении сети. Анализ выполняет МП по характерным точкам. В публикации [6] предлагается идентифицировать последовательную дугу в промышленных сетях переменного тока, используя факт хаотичного изменения энергии многократно измеренного спектра тока.

Наиболее полно хаотические изменения электрических параметров дуги описаны в обширной вступительной части патента США № US 6362629 (Hendry Mech. Work Systems, 2002), где изложены представления о дуге как о рекурсивном явлении с фракталами в виде факта хаотичности изменения параметров во всех частях частотного диапазона, с уменьшением амплитуды пульсаций по мере увеличения частоты по законам «розового шума». Возможность обнаружения дуги авторы видят в наличии факта хаотичности процессов после многократного повторения следующих операций: выделение частоты, выпрямление, фильтрация с постепенным увеличением выделяемых частот.

#### *1.8.4 Комплекс признаков.*

Во многих технических решениях идентификация дуги основана на использовании комплекса её признаков. Так, в патенте США № US 6377427 (Square D, 2002) устройство обнаружения дуги в промышленных сетях содержит многоканальный полосовой фильтр, перекрывающий диапазон частот 10...100 кГц, и датчик  $dI/dt$  в сигналах о токе. Схема производит анализ хаотичности следования импульсов, сформированных из  $dI/dt$  с помощью МП. По такому же принципу сформирован патент США № US 6625550 (Square D, 2003), являющийся модификацией предыдущего

применительно к авиационным системам переменного тока. Найденное решение запатентовано в BRD под № DE 10017238.

В патенте США № US 6577138 (Eaton, 2003) предложена схема идентификации параллельной дуги по её хаотичному шуму в комбинации с фактом увеличения среднего значения тока в DC системе с циклическими помехами.

В патенте США № WO 2006/121496 (Honeywell Inc., 2006) рассматривается структура защиты от параллельной и последовательной дуг в AC и DC системах, основанная на мониторинге основных гармоник в сигнале о токе и параметров пульсаций.

В патенте США № US 7003435 (Leviton Manufacturing, 2006) описано устройство обнаружения дуги, основанное на анализе тока, и  $\pm di/dt$  в сигналах о переменном токе, уровня шума и синтезе с помощью МП эквивалентной синусоиды измеренного тока для последующего её сравнения с эталонной. Похожее решение, основанное на дискретном считывании сигнала о токе, интерполяции результатов и синтезе эквивалентной синусоиды, содержится в патенте России № 2249227 (Ehlenberger und Poensgen GMBKh, 2005).

В заявке BRD № 102004058957 (Hella KGaA Hueck & Co, 2006) предлагается устройство защиты автомобильной сети, контролирующее ток, производную тока, шумы в двух частотных диапазонах и соотношение уровней этих шумов. В заявке США № 2011/0249370 (Siemens Industry Inc., 2011) в общем виде заявлен алгоритм обнаружения дуги с использованием двух (неназванных) критериев и введении задержки на неаварийные переходные процессы в системе. В заявке США № 2012/0098672 (Cooper Technologies Corp., 2012) предлагается контролировать возникновение дуги мониторингом низкочастотной и высокочастотной областей, причём в низкочастотной области измерять действующее значение переменного тока фидера и при аварийном увеличении этого тока уменьшать время

распознавания дуги (формировать своего рода время-токовую характеристику отключения цепи с аварийной дугой).

Обратим внимание на то, что идентификация дуги по признакам её хаотичности может провоцировать ложные отключения защиты в трёх случаях:

- при наличии нагрузок, генерирующих неаварийные дуговые процессы (коллекторные электродвигатели постоянного тока);
- при наличии помех, наводимых в исправную цепь из цепи с аварийной дугой;
- при наличии в системе электропитания одновременно существующих гармонических помех широкого спектра, суммирование которых создаёт хаотические изменения результирующего сигнала в пределах некоторого интервала повторения. Этот интервал тем больше, чем ближе соседние частоты помех. Ложное отключение возникнет, если интервал контроля шума окажется меньше, чем период биений помехи.

### ***1.9. Сравнение нормальных и аварийных процессов.***

Рассмотрим теперь технические решения, основанные на сравнении нормальных и аварийных процессов. В наиболее общем виде эта идея сформулирована в патенте США № US 7177125 (Honeywell Inc., 2007), где заявлен принцип индикации дуги по итогам сравнения текущих значений контролируемого тока с эталонными его значениями, содержащимися в памяти МП и записанными туда ранее по результатам стендовых испытаний с реальными нагрузками. Деталей и алгоритмов сравнения патент не содержит.

В ряде патентов освещаются частные аспекты процесса подобного сравнения. Так в публикации [17] и в полученном авторами публикации патенте США № US 7366622 (X-L Synergy., 2008), предлагается использовать математические модели нагрузок с возможностью изменения их параметров на случай изменения режимов работы. Коррекция параметров производится с



использованием алгоритма минимизации ошибки по методу наименьших квадратов.

В патенте России № 2479866 С1 (2013) рассматривается метод идентификации последовательной дуги в цепях переменного тока, построенный на измерении уровня шума дуги в сигнале о токе за вычетом шума от нагрузок и с учётом только тех мгновенных напряжений в сети, которые способны зажечь дугу.

В патенте США № US 6525918 (Ford Corp., 2003) предлагается устройство защиты от дуги в автомобильных СЭС постоянного тока, способное отличить аварийную дугу от неаварийных дуговых разрядов в коммутационной аппаратуре. Информация о неаварийных дуговых разрядах записана в память МП.

В заявке № DE 6020050055160Т2 Германии и в патенте России № RU 2484487 (оба документа с приоритетом патента Франции № 0410384, Airbus France, 2004) изложены методы идентификации коронных разрядов, предшествующих развитию аварийной дуги в авиационных системах. В основе методов: составление цифровых «портретов» начальной фазы дуги в ходе многочисленных экспериментов с дугой; составление «портретов» нагрузок и неаварийных процессов в сети; сравнение «портретов» текущих процессов по результатам измерения тока и напряжения с «портретами», заложенными в память процессора и формирования заключения о наличии аварии с привлечением теории вероятности.

В патенте Великобритании № GB 2375244 (Smiths Group, 2002) предлагается строить методы идентификации дуговых разрядов, опираясь на анализы напряжения сети, тока в нагрузке и её модели.

В заявке США № 2011/0299201 (Hamilton Sundstrand Corp., 2011) предлагается в устройствах идентификации аварийных дуговых разрядов использовать новые свойства транзисторной коммутационно-защитной аппаратуры, заключающиеся в возможности амплитудного ограничения токов. Предлагаемое устройство ликвидирует параллельную дугу

постоянного тока и содержит SSPC. Контролируется ток в фидере и при превышении им порогового значения транзисторный ключ выводится в активный режим ограничения тока, после чего измеряется напряжение на выходе SSPC. Если оно оказывается меньше опорного, ключ переводится в режим широтно-импульсной модуляции (ШИМ), оставаясь при этом в активной области. Сравнивается временная диаграмма напряжения на выходе SSPC с эталонной диаграммой, соответствующей нормальной емкостной нагрузке. В случае резкого различия диаграмм устройство отключается. Отметим, что описанная заявка является одной из немногих, где используются новая функциональная возможность транзисторной КЗА – её способность диагностировать состояние цепи нагрузки заданным уровнем тока.

В патенте США № US 6683766 B1 (Yazani North-America, 2004) описана практическая схема предупреждения возникновения последовательной дуги в автомобильных системах постоянного тока, использующая факт резкого падения тока в первый момент перед образованием дуги (за счёт увеличения сопротивления в месте разрыва). По мнению авторов, схема предупреждает «горячий» пожароопасный этап развития дуги. Возможность использования резкого падения тока в начале дугообразования в качестве индикатора дуги упоминается также в публикации [16]. Отметим, однако, что этот метод защиты требует введения целого ряда её блокировок на все случаи неаварийных спадов тока в нагрузках.

### **Выводы по главе 1.**

1. В результате анализа по аварийным дуговым разрядам в СЭС выполнена их классификация по типу и параметрам СЭС, характеру исследований, физическим основам и конкретным методам индикации и ликвидации дуги.

2. Установлено, что наибольшее число публикаций относится к промышленным и бытовым СЭС переменного тока, что объясняется

большим количеством 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.

3. 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, поскольку наибольшее количество сложных нагрузок приходится на системы постоянного тока.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. В связи с вышеизложенным основную цель исследований можно сформулировать как разработку методов защиты авиационных систем распределения электроэнергии 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.

## ГЛАВА 2

### **Методы ликвидации параллельной дуги в авиационных системах электроснабжения постоянного тока.**

Параллельная дуга в авиационных СЭС постоянного тока может возникать в процессе периодического касания проводом с повреждённой изоляцией металлического корпуса самолёта. При этом провод может быть оторван от нагрузки, либо остаться соединённым с ней. Возникновению подобных аварий способствует вибрация корпуса и несущих конструктивных элементов системы распределения электроэнергии. Частота вибраций по авиационным нормам составляет 5...2000 Гц. Действующие значения токов в цепях «перемежающихся» коротких замыканий (КЗ) по данным, приводимым в технической литературе, могут оказаться недостаточными для срабатывания традиционной тепловой аппаратуры защиты. Однако полупроводниковая (в первую очередь транзисторная) аппаратура коммутации и защиты (АЗК) обладает более широкими функциональными возможностями, нежели тепловая. Одним из новых свойств транзисторных АЗК является способность к амплитудному ограничению токов при аварийных перегрузках.

#### ***2.1. Методы ликвидации параллельной дуги средствами транзисторных АЗК.***

В американской заявке на патент № US2011/0299201 «SSPC for parallel arc fault detection in DC power systems», поданной фирмой «Hamilton Sundstrand», описан следующий принцип ликвидации параллельной дуги в СЭС постоянного тока. Контролируется ток через АЗК и при превышении им определённого порога силовой транзистор АЗК выводится в активный режим на заданном уровне тока. После этого контролируется напряжение на нагрузке. Если оно больше некоторого опорного, транзисторный ключ возвращается в исходное состояние. Если меньше – ключ, оставаясь в активном режиме, переводится в режим ШИМ и процессор, находящийся в составе АЗК, анализирует форму напряжения на нагрузке. Если эта форма

соответствует нормальной нагрузке, схема возвращается в исходное состояние, если нет – схема отключается.

Предложим другой принцип ликвидации параллельной дуги. Известно, что функция кратковременного ограничения тока необходима в транзисторных аппаратах, предназначенных для замены контактной КЗА в составе традиционных авиационных систем для того, чтобы иметь возможность управлять нагрузками емкостного характера (блоками радиоэлектронной аппаратуры с конденсаторными фильтрами в цепях питания) [40]. Уровень ограничения тока может быть неизменным во времени и установленным выше, чем пусковые токи нагрузок резистивного и индуктивного характера. Однако выгоднее сделать его зависимым от напряжения на нагрузке (или на силовом ключе), чтобы при КЗ этот уровень автоматически устанавливался минимальным в целях разгрузки силового транзистора. 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. При этом ток в дуге будет ограничен на уровне, соизмеримом с номинальным током АЗК [42]. Аварийное отключение АЗК произойдёт спустя время выдержки, большее, чем время нормального заряда ёмкости нагрузки, но в пределах нескольких миллисекунд

## ***2.2. Моделирование АЗК с функцией ликвидации параллельной дуги.***

Описанный принцип ликвидации перемежающегося КЗ был промоделирован и после этого исследован на лабораторном макете.

На рис. 2.1 приведена компьютерная модель, описывающая несколько функциональных блоков АЗК и цепи различных по характеру нагрузок. В состав схемы (программа «PSpice» системы «OrCAD») входят следующие блоки АЗК:

- силовой ключ на МДП транзисторе М1;

- непрерывный ограничитель тока на Q8, Q9;
- интегратор интервала ограничения на R12, C1;
- компаратор формирования команды аварийного отключения с цепью блокировки на XU1;
- импульсные усилители на Q1... Q7;
- блок контроля температуры перегрева силового транзистора над температурой его основания на перемножителе типа АВМ/І с тепловой моделью силового транзистора на R6... R9, C2...C5.

Силовой транзисторный ключ дополнен цепью защиты от перенапряжений на D4, V3.

В состав приведённой схемы АЗК не включены блок управления и сигнализации, а также формирователь время-токовой защитной характеристики (как не участвующие в процессе индикации и ликвидации дуги).

Цепь нагрузки состоит из резисторов R29 и R32, дросселя нагрузки L2, конденсатора нагрузки C7, дросселя L1, отражающего наличие индуктивности фидера. Резисторы R29, R32, R33 выполняют также дополнительную роль переключателей нагрузок. Короткое замыкание нагрузок моделируется включением симметричного МДП ключа на M2, M3, который управляется с необходимой частотой от источника прямоугольного напряжения V5.

На рис. 2.2 приведены временные диаграммы нормального включения RC нагрузки с номинальным током 1 А и регулируемым уровнем ограничения тока, который изменяется в ходе процесса от минимального значения 2 А до максимального – 10 А (верхняя диаграмма).

Время включения составляет 1,1 мс. На средней диаграмме – напряжение «затвор-исток» силового транзистора, на нижней – температура перегрева его кристалла в градусах Цельсия относительно основания, на которое установлен кристалл транзистора.

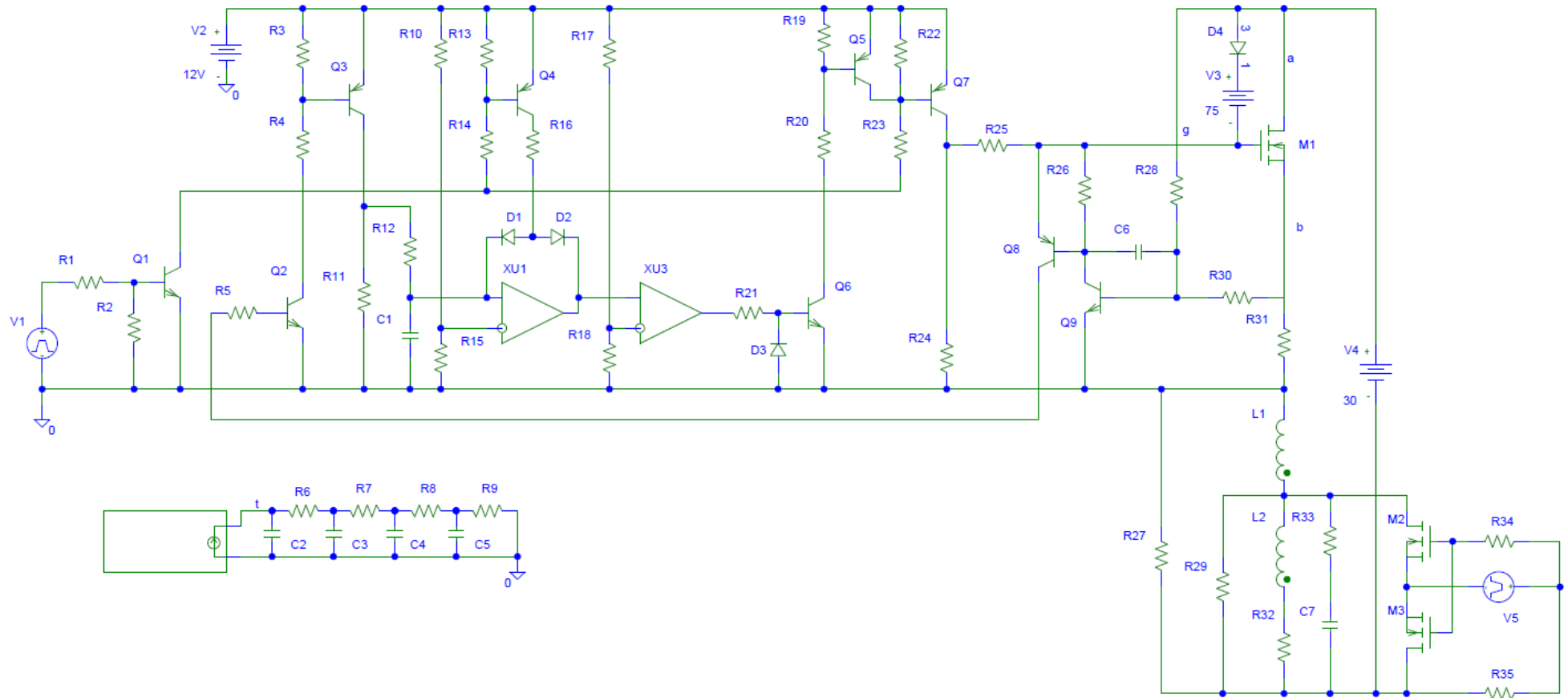


Рис. 2.1. Компьютерная модель АЗК.



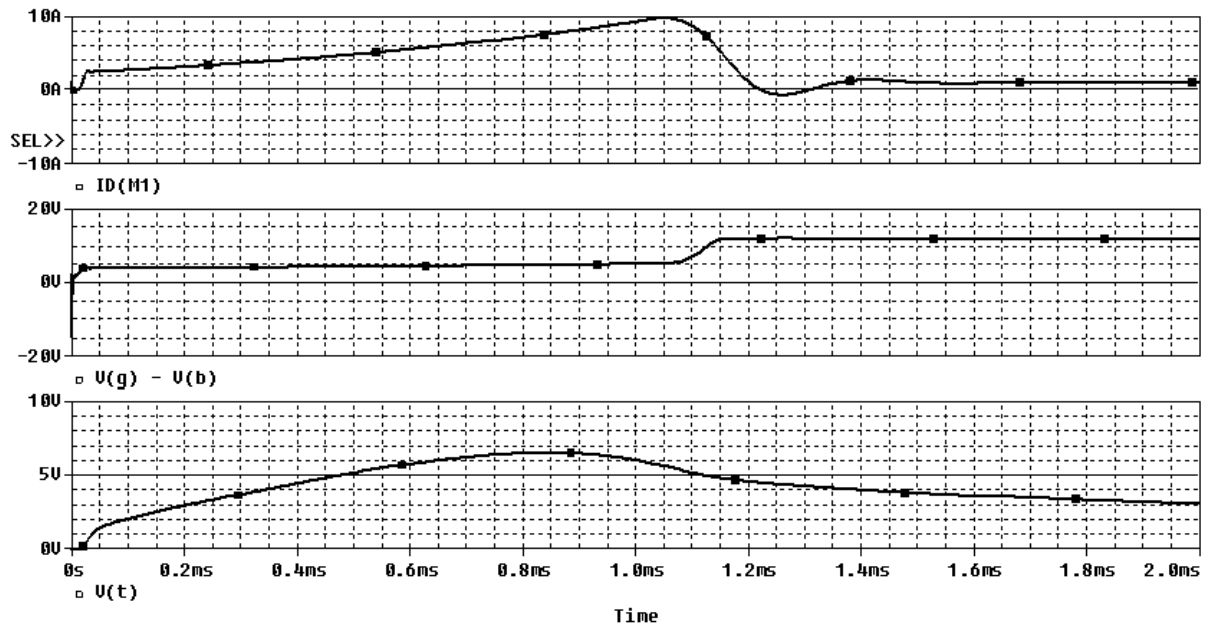


Рис. 2.2. Процессы коммутации RC-нагрузки.

На рис. 2.3 приведены временные диаграммы процесса ликвидации перемежающегося КЗ резистивной нагрузки с частотой 500 Гц. Время ликвидации – примерно 6 мс. В моменты перехода силового транзистора в режим ограничения наблюдаются всплески тока амплитудой до 30 А и продолжительностью около 3 мкс, возникновение которых объясняется инерционностью силового транзистора и цепи ограничения.

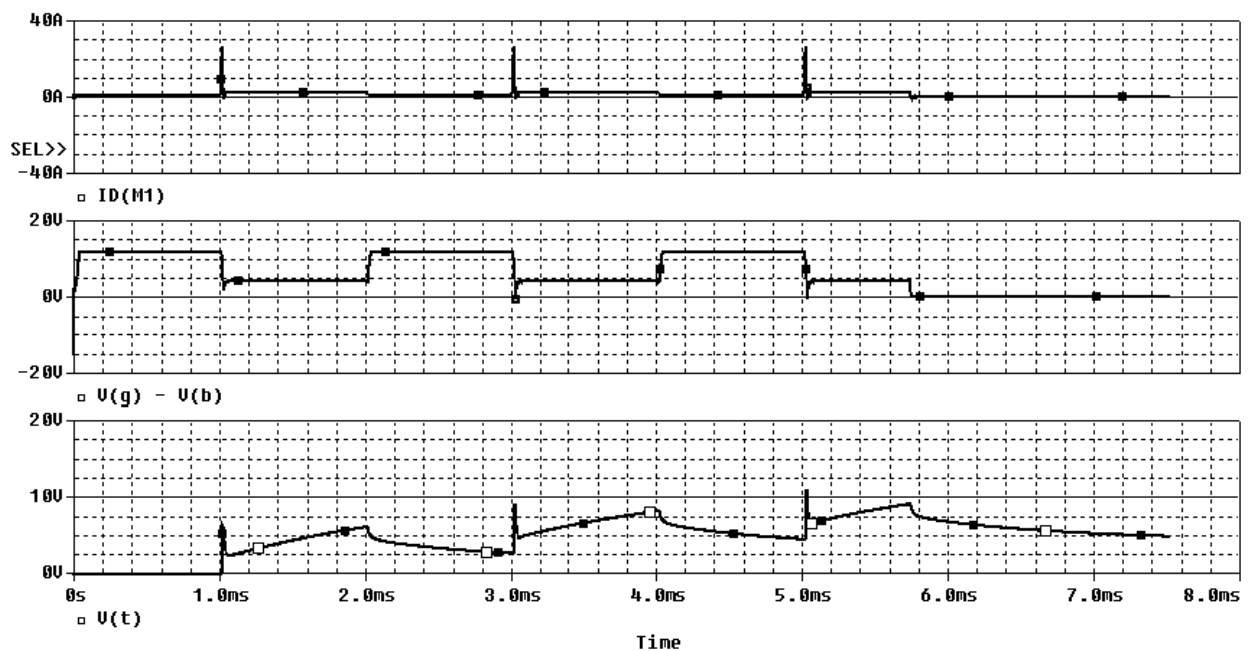
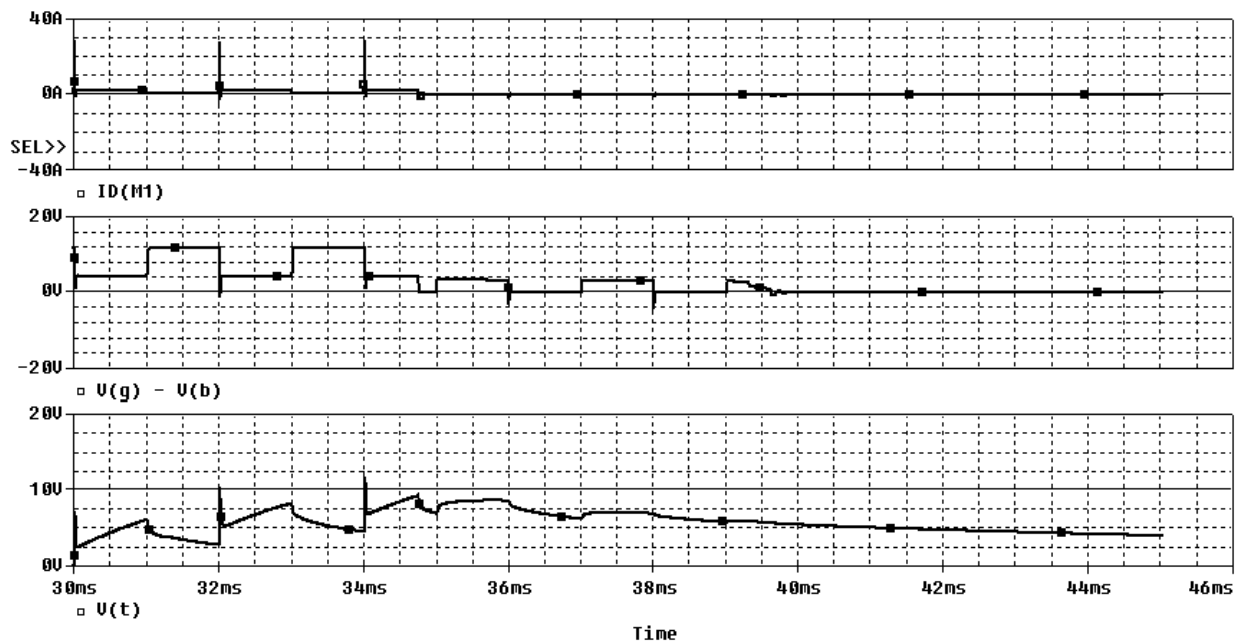


Рис. 2.3. Процессы ликвидации дуги, параллельной R-нагрузке.

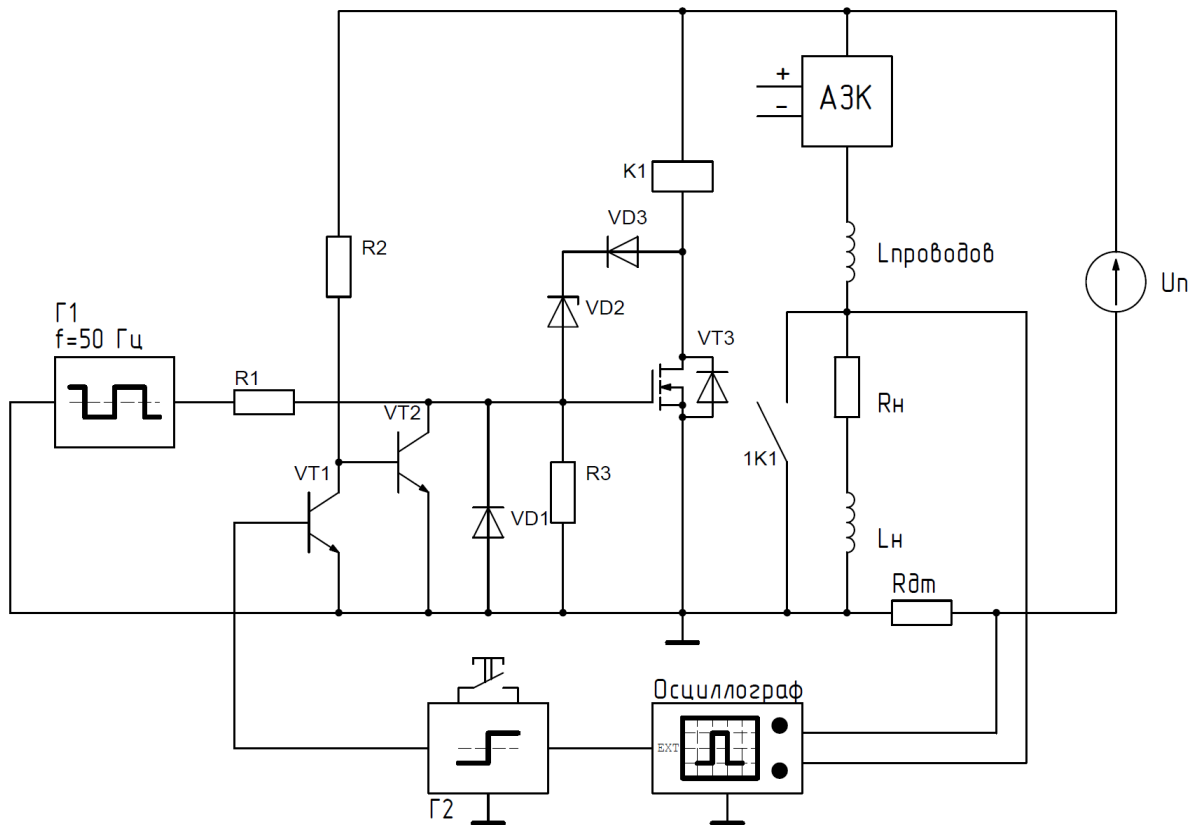
На рис. 2.4 приведены временные диаграммы процесса ликвидации перемежающегося КЗ активно-индуктивной нагрузки с частотой 500 Гц. В источнике V5 запрограммирована временная задержка, достаточная для нарастания тока в нагрузке до номинального значения. Постоянная времени индуктивной нагрузки принята равной 8 мс, что задано в авиационных нормалях. При ликвидации КЗ в паузах между замкнутыми состояниями ключей M2 и M3 ЭДС индуктивной нагрузки отпирает диод D4 цепи защиты и энергия, запасённая в нагрузке, частично выделяется в силовом транзисторе. Этот процесс продолжается по окончании интервала активного ограничения тока и занимает в целом около 40 мс.



*Рис. 2.4. Процессы ликвидации дуги, параллельной RL-нагрузке.*

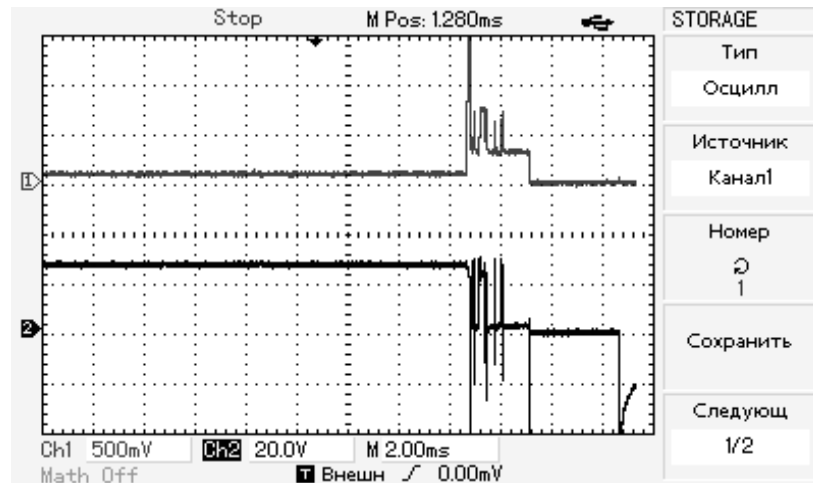
На рис. 2.5 приведена функциональная схема лабораторного макета для испытаний АЗК в режиме ликвидации перемежающихся КЗ. Испытания проводились с индуктивно-активной нагрузкой. Периодические КЗ на низкой частоте (50 Гц) осуществлялись нормально разомкнутыми контактами авиационного реле К1 типа ТКЕ со снятым кожухом для визуального наблюдения за образованием и ликвидацией дуги. Периодические КЗ на повышенной частоте (500 Гц) осуществлялись транзисторным ключом с односторонней проводимостью VT3 с цепью защиты от перенапряжения.

Транзистор VT2 с диодом VD1 блокируют прохождение сигнала на затвор VT3. Транзистор VT1 блокирует базу VT2. Процесс начинается включением АЗК и установкой тока нагрузки. Далее вручную запускается генератор Г2, который выдает прямоугольный однократный импульс, продолжительностью 1 с. Этот импульс открывает VT1, после чего VT2 запирается, а VT3 начинает переключаться с частотой, заданной генератором Г1. Одновременно запускается развёртка запоминающего осциллографа.



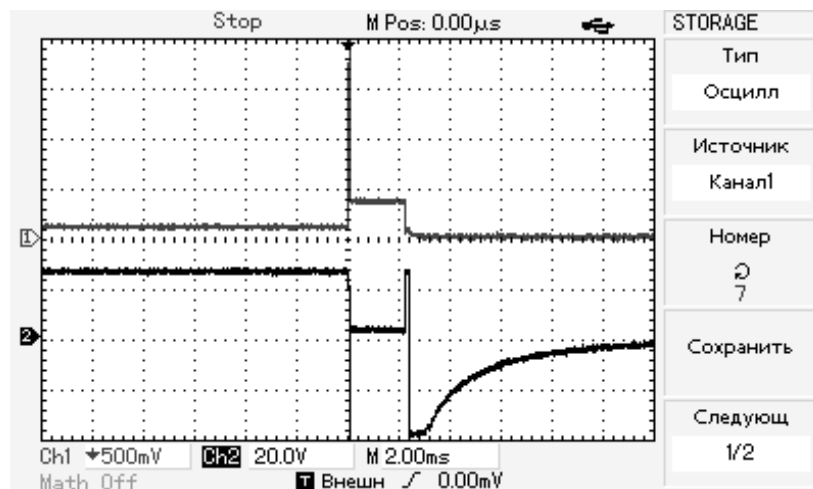
*Рис. 2.5. Функциональная схема лабораторного макета для испытаний АЗК в режиме ликвидации перемежающихся КЗ.*

На рис. 2.6 приведены осциллограммы ликвидации КЗ, созданного параллельно индуктивно-активной нагрузке с помощью контактов реле на частоте 50 Гц. Уровень тока ограничения на верхней осциллограмме тока регулируется. На нижней осциллограмме (напряжение на нагрузке) содержатся всплески, характерные для дуги, которая наблюдается и визуально. Время ликвидации дуги составляет примерно 3 мс.

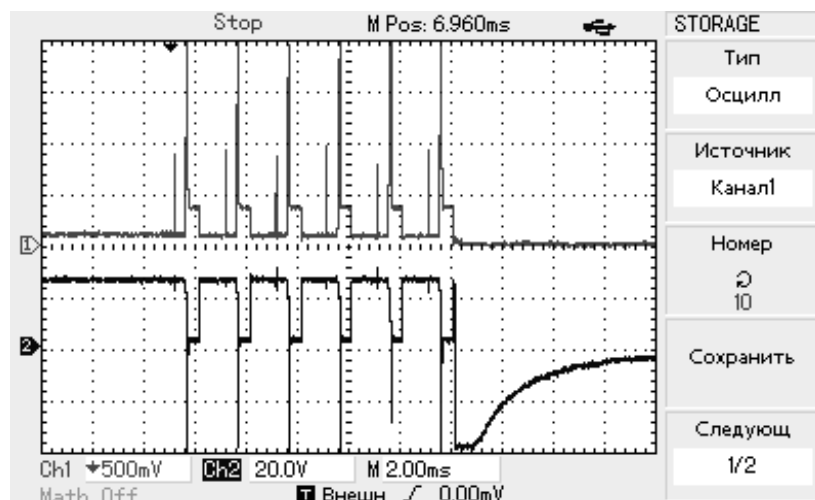


*Рис. 2.6. Осциллограммы ликвидации КЗ активно-индуктивной нагрузки, созданного контактами реле на частоте 50 Гц.*

На рис. 2.7 приведены осциллограммы ликвидации КЗ, созданного параллельно индуктивно-активной нагрузке с помощью транзисторного ключа на частоте 50 Гц при регулируемом уровне ограничения тока (время ликвидации – 2,5 мс). На рис. 2.8 – те же осциллограммы на частоте 500 Гц (время ограничения – 10 мс).



*Рис. 2.7. Осциллограммы ликвидации КЗ активно-индуктивной нагрузки, созданного транзисторным ключом на частоте 50 Гц.*



*Рис. 2.8. Осциллограммы ликвидации КЗ активно-индуктивной нагрузки, созданного транзисторным ключом на частоте 500 Гц.*

Приведённые осциллограммы подтверждают результаты моделирования и эффективность рассмотренного способа ликвидации параллельной дуги.

### **Выводы по главе 2.**

1. Предложены способ и технические средства его реализации для индикации и ликвидации установившихся, либо прерывистых дуговых разрядов параллельного типа, основанные на способности транзисторных аппаратов защиты к амплитудному ограничению аварийных токов на время, достаточное для нормального включения емкостных нагрузок.

## ГЛАВА 3

### **Исследование свойств последовательной дуги в авиационных низковольтных сетях постоянного тока.**

#### ***3.1 Возникновение и развитие дуговых разрядов.***

Низкие напряжения традиционных авиационных СЭС постоянного тока (27 В) не способны пробивать аварийно возникающие воздушные промежутки в местах разрывов проводов, либо в местах нарушения электрических контактных соединений. Поэтому аварийная дуга в низковольтных сетях возникает не как развитие первоначального электрического искрового разряда, а в результате разогрева неплотного контактного соединения, имеющего значительное электрическое сопротивление. Далее следуют: эмиссия металла электродов, ионизация возникшего воздушного промежутка и возникновение аварийного разряда, при определённых условиях переходящего в дуговой с плазменным столбом, имеющем температуру 6000...10000 °С. Дальнейшее течение процессов диктуется внешними условиями. Если под действием механических сил образовавшийся зазор увеличивается, то через некоторое время дуга может погаснуть, когда напряжение источника, питающего цепь, окажется недостаточным для преодоления возрастающего напряжения на дуге. Если же зазор не увеличивается, то дуга может устойчиво гореть продолжительное время и стать причиной аварийного возгорания материалов изоляции провода или жгута с проводами. В авиационных системах возможен третий сценарий: возникновение прерывистой дуги с чередующимися фазами её зажигания и исчезновения под действием вибрации места ненадёжного контакта. Вынуждающая частота вибраций по авиационным нормам может составлять 5...2000 Гц, однако сам процесс прерывания дуги жёстко не связан с внешними вибрационными возмущениями, а имеет хаотический характер, являющийся отражением взаимодействия вибраций основания

узла, инерционности его элементов, упругих свойств подводящих проводов и др.

Процессы возникновения и развития дуговых разрядов удобно проследить в ходе размыкания контактных пар, входящих в состав электромагнитных реле или контакторов. Эти процессы не считаются аварийными, поскольку воздушные промежутки между разомкнутыми контактами выбираются достаточно большими, что гарантирует деионизацию дуги.

На рис. 3.1 приведена схема, предназначенная для исследования процессов возникновения и развития последовательной дуги в цепях с нагрузками различного характера. Схема содержит силовой МДП ключ, коммутирующий обмотку авиационного электромагнитного реле К1 типа ТКЕ 56 ПД. На вход схемы управления (СУ) МДП транзистора поступает одиночный импульс прямоугольной формы с регулируемой продолжительностью. Этот же импульс через цепь задержки (ЦЗ) запускает развёртку многоканального ждущего цифрового осциллографа. Осциллограф фиксирует напряжение на размыкающихся контактах реле и напряжение с резистивного датчика тока  $R_{дт}$ .

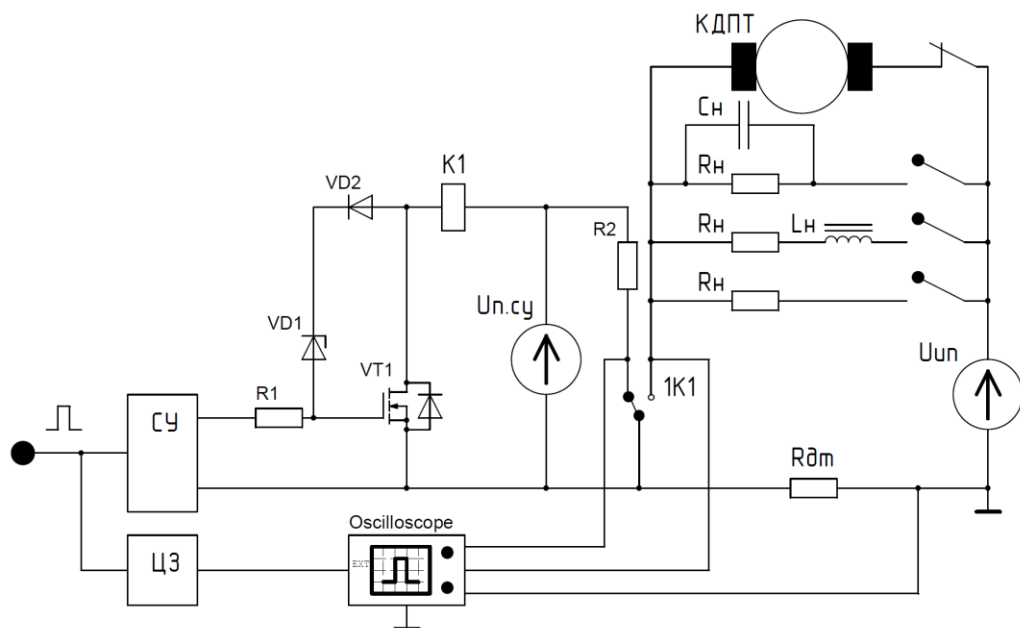


Рис. 3.1. Схема лабораторного макета для исследования возникновения и развития дуговых разрядов.

На рис. 3.2 приведены осциллограммы тока в цепи резистивной нагрузки (вверху) и напряжения на контактной промежутке (внизу). Начальное (номинальное) значение тока нагрузки до зажигания дуги – 4 А, напряжение источника питания – 30 В. Максимальное расстояние между контактами – 1 мм, время горения дуги – 0,35 мс. Процесс образования и развития дуги состоит из трёх стадий:

- зажигание дуги с быстрым увеличением напряжения на дуге до уровня  $U_{д.мин} = U_A + U_K$ , где:  $U_A$  и  $U_K$  – перепады напряжений вблизи анода и катода; увеличение напряжения на дуговом промежутке вызывает синхронное уменьшение тока в цепи;
- слабый рост напряжения на дуге со слабым спадом тока из-за увеличения напряжения на плазменном столбе по мере увеличения его длины;
- исчезновение дуги с резким увеличением напряжения до напряжения питания и спадом тока до нуля.

На графиках тока и напряжения просматривается «шум дуги» – пульсации напряжения и тока с хаотическими изменениями амплитуды импульсов и интервалов между ними.

Рис 3.3 иллюстрирует процессы в схеме при напряжении источника питания 15 В, т.е. при напряжении меньшем, чем номинальное напряжение сети и лишь немногим больше, чем напряжение на дуге, что лишний раз свидетельствует о возможности зажигания дуги в низковольтных сетях. В приведённом примере дуга горит 0,15 мс при токе 0,5 А.

На рис. 3.4 приведены осциллограммы процессов в рассматриваемой схеме с индуктивно-активной нагрузкой. Номинальный уровень тока – 3 А, время горения дуги – 7 мс, максимальная длина столба возросла, увеличилось напряжение на дуге. Из-за снижения тока на участке движения контактов возникла электродвижущая сила самоиндукции (ЭДС), которая, сложившись с напряжением питания, вызвала перенапряжение на дуге:



$$U_D(t) = U_{\text{ин}} + L_H * (dI_H / dt) - R_H * I_H(t)$$

В конце процесса резкий спад тока сопровождается значительным броском перенапряжения на воздушном промежутке.

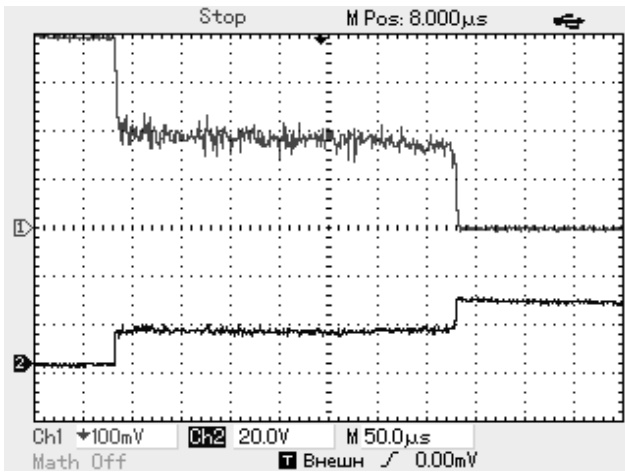


Рис. 3.2. Осциллограммы процессов в схеме рис. 3.1 с резистивной нагрузкой. Номинальный ток нагрузки 4 А, напряжение источника питания 30 В.

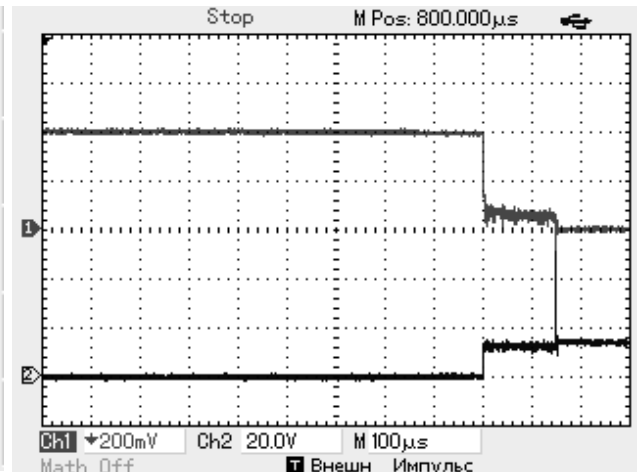


Рис. 3.3. Осциллограммы процессов в схеме рис. 3.1 с резистивной нагрузкой. Номинальный ток нагрузки 4 А, напряжение источника питания 15 В.

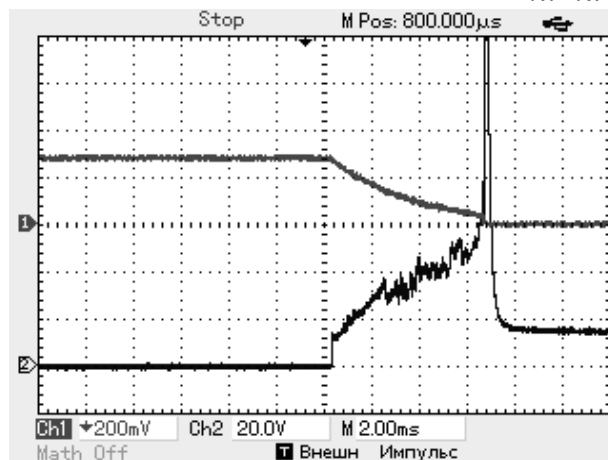
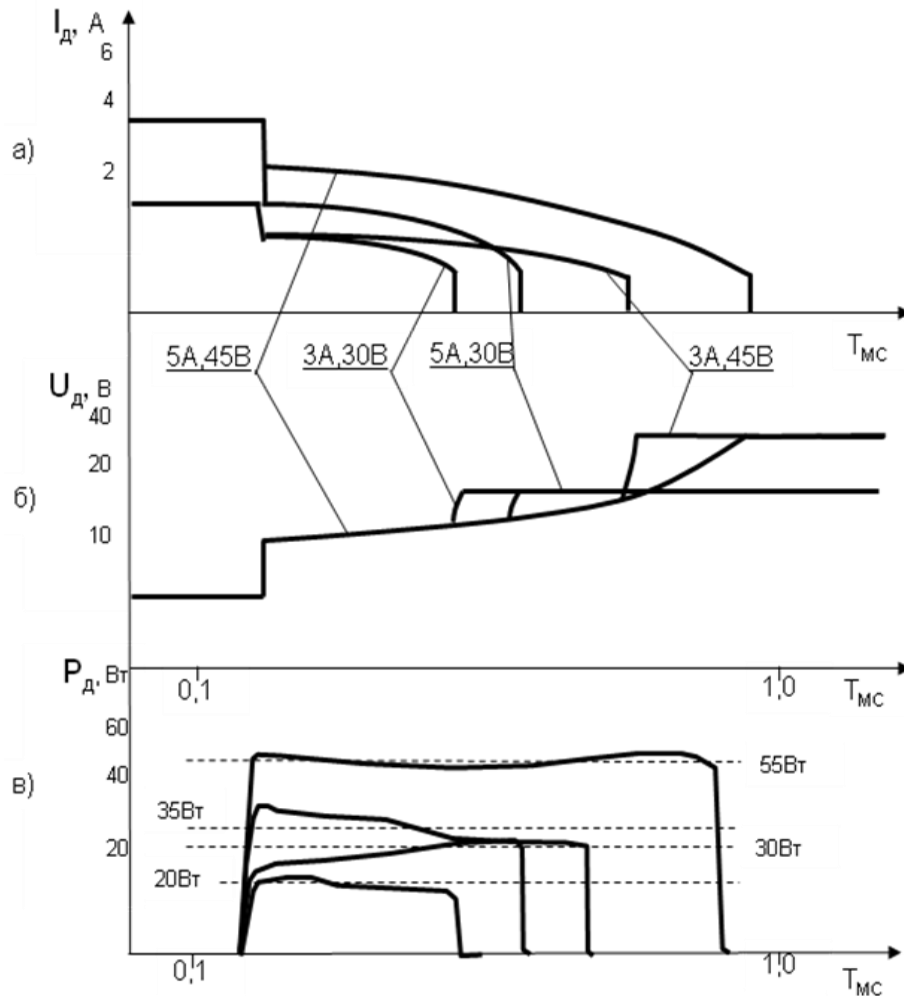


Рис. 3.4. Осциллограммы процессов в схеме рис. 3.1 с RL-нагрузкой. Номинальный ток нагрузки 3 А, напряжение источника питания 30 В.

Время горения дуги возрастает с увеличением напряжения питания, номинального тока нагрузки и индуктивности нагрузки. На рис 3.5 приведены временные диаграммы процессов развития дуги в схеме на рис. 3.1 с резистивной нагрузкой при различных напряжениях питания и сопротивлениях нагрузки, построенные по предварительно снятым осциллограммам. Верхние кривые соответствуют токам, средние – напряжениям, а нижние – мощностям потерь в дуге, которые на втором этапе

процессов оказываются примерно постоянными, что может служить основой для разработки достаточно простых статических моделей дуги.

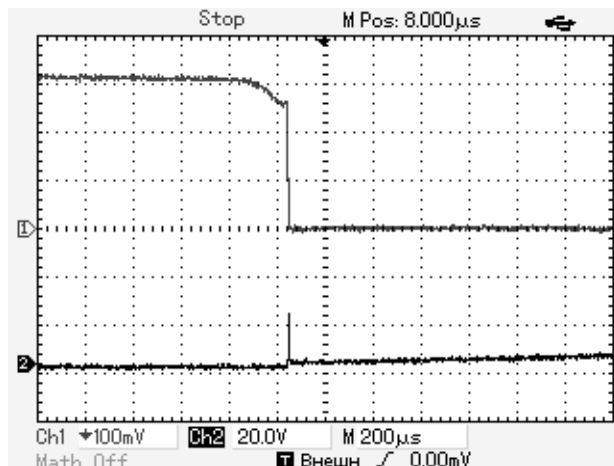


*Рис. 3.5. Процессы возникновения и развития дуги в цепи с резистивной нагрузкой при вариации сопротивления нагрузки и напряжения источника питания: а) токи, б) напряжения, в) мощности.*

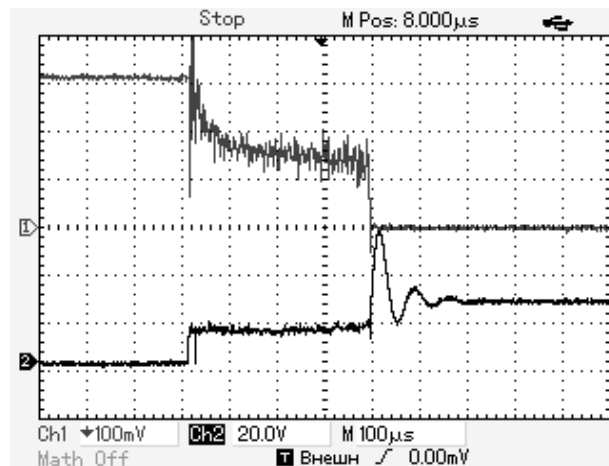
Обратим внимание на то, что начальное напряжение на дуге не зависит ни от номинального значения тока, ни от напряжения питания. Это свойство можно использовать при оценке относительного изменения тока в момент зажигания дуги как критерия её возникновения. Относительное изменение тока в цепях с резистивными нагрузками составит:  $\delta I_H = U_{д.мин} / U_{шт}$

На рис. 3.6, 3.7 приведены осциллограммы процессов в схеме с резистивно-емкостной нагрузкой (RC нагрузкой). Величина ёмкости конденсатора варьировалась в экспериментах с 0,47 мкФ до 1000,0 мкФ. Напряжение питания – 30 В. Анализ процессов обнаруживает признаки

возникновения дуги лишь при относительно малых значениях ёмкости конденсатора. При  $C > 1$  мкФ дуги не возникало, поскольку в первой фазе процесса конденсатор заряжен до напряжения питания и напряжение на дуге близко к нулю.



*Рис. 3.6. Процессы разрыва цепи с RC-нагрузкой. Емкость конденсатора 1000 мкФ. Напряжение питания 30 В. Номинальный ток нагрузки 3 А.*

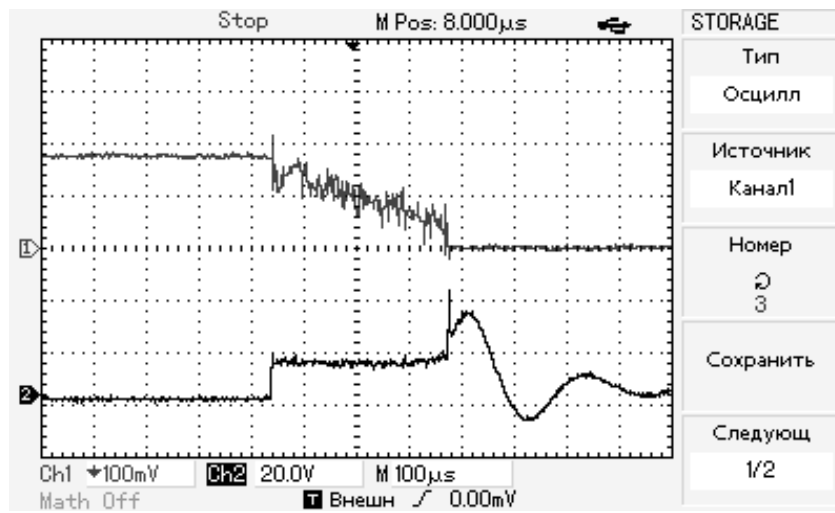


*Рис. 3.7. Процессы разрыва цепи с RC-нагрузкой. Емкость конденсатора 0,47 мкФ. Напряжение питания 30 В. Номинальный ток нагрузки 3 А.*

Рассмотренный случай представляет практический интерес для входных цепей источников вторичного электропитания (ИВЭ) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), содержащих низкочастотные фильтры с емкостным импедансом.

Похожие процессы имеют место при аварийных разрывах цепей с коллекторными электродвигателями постоянного тока (КДПТ), входящими в состав электромагнитных механизмов. Схема замещения КДПТ, кроме сопротивления и индуктивности якоря, содержит ЭДС вращения. Индуктивность якоря поддерживает ток в месте разрыва, но ЭДС вращения уменьшает напряжения на воздушном промежутке, препятствуя возникновению и горению дуги. Если электродвигатель работает в режиме, близком к холостому ходу, то дуга не сможет возникнуть. С увеличением механической нагрузки на валу машины вероятность возникновения дуги увеличивается.

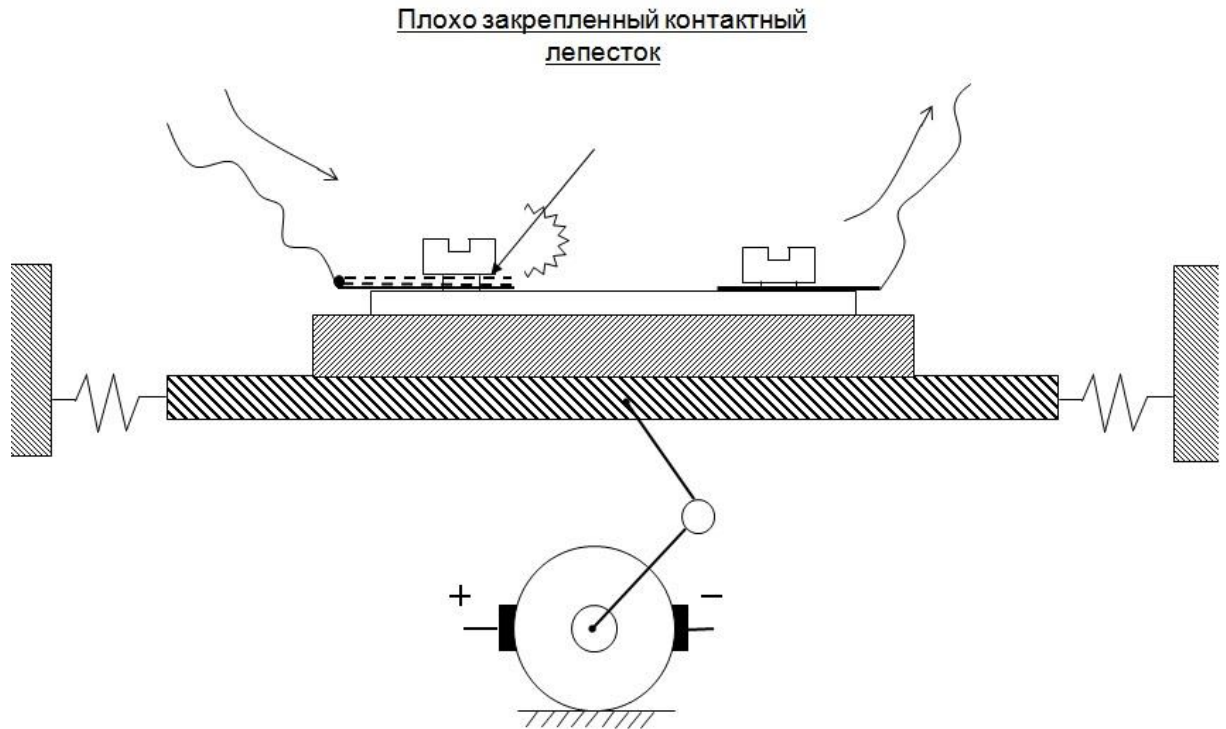
На рис. 3.8 приведены осциллограммы процессов размыкания контактов реле, коммутирующих якорную цепь коллекторного электродвигателя, входящего в состав электромашинного трёхфазного инвертора ПАГ – 1Ф, питающего гиросотор авиагоризонта. Номинальный ток цепи – 2 А, напряжения питания – 30 В. Генератор инвертора работает в режиме, близком к холостому ходу. Дуга возникла, но её продолжительность составила 0,35 мс.



*Рис. 3.8. Процессы разрыва цепи с КДПТ. Ток нагрузки 2 А, напряжение питания 30 В.*

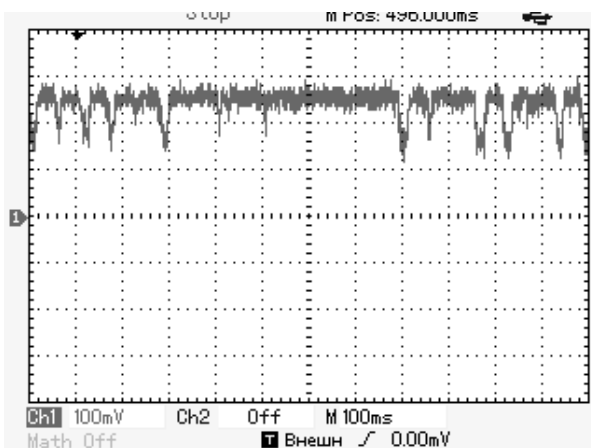
### **3.2 Прерывистая последовательная дуга.**

Для воспроизведения прерывистой дуги в условиях, приближенных к реальным, был спроектирован и изготовлен портативный вибростенд, основу которого составил приводной электродвигатель с кривошипным механизмом, раскачивающий текстолитовую платформу, подвешенную на четырёх пружинах (рис. 3.9). Частота вибраций регулируется изменением напряжения на двигателе. На платформу устанавливаются узлы, несущие электрические контактные соединения: контактные колодки, либо устройства коммутационно-защитной аппаратуры. Провода электросети крепятся к ламелям колодок, или других узлов с помощью лепестков, прижатых винтами через уплотнительные шайбы. Затяжка винтов в ходе экспериментов регулируется.

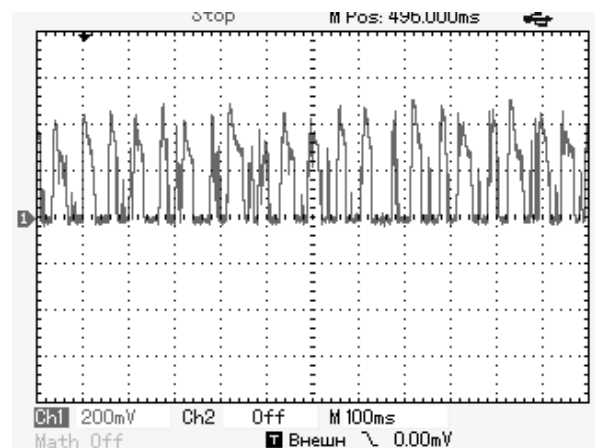


*Рис. 3.9. Схема стенда для испытаний электрических контактных соединений на устойчивость к вибрациям.*

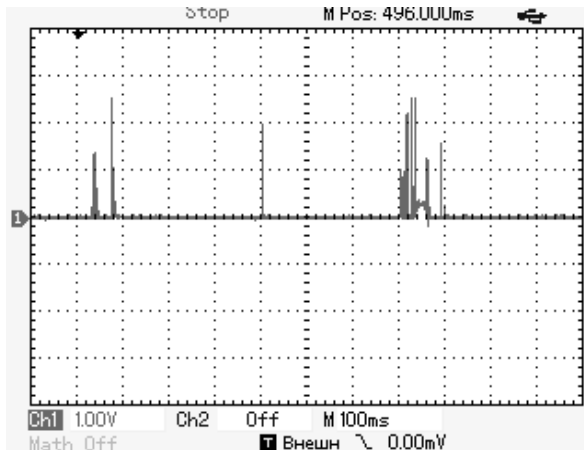
На рис. 3.10...3.13 приведены осциллограммы хаотических токов в цепях с реальными нагрузками авиационных сетей: обмотками мощных контакторов, коллекторными электродвигателями приводных механизмов, ИВЭ РЭА в двух вариантах: с цепями защиты от повышения и понижения входного напряжения (рис. 3.12) и без таких цепей (рис. 3.13).



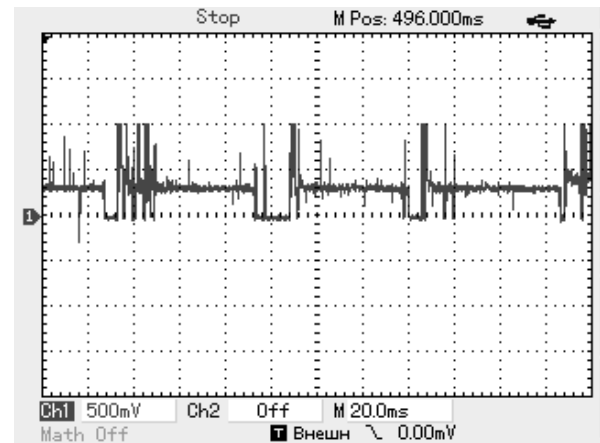
*Рис. 3.10. Осциллограмма тока хаотической прерывистой дуги в цепи с электромагнитным контактором.*



*Рис. 3.11. Осциллограмма тока хаотической прерывистой дуги в цепи с КДПТ.*



*Рис. 3.12. Осциллограмма тока хаотической прерывистой дуги в цепи ИВЭ РЭА, с защитой от переходных напряжений питания.*



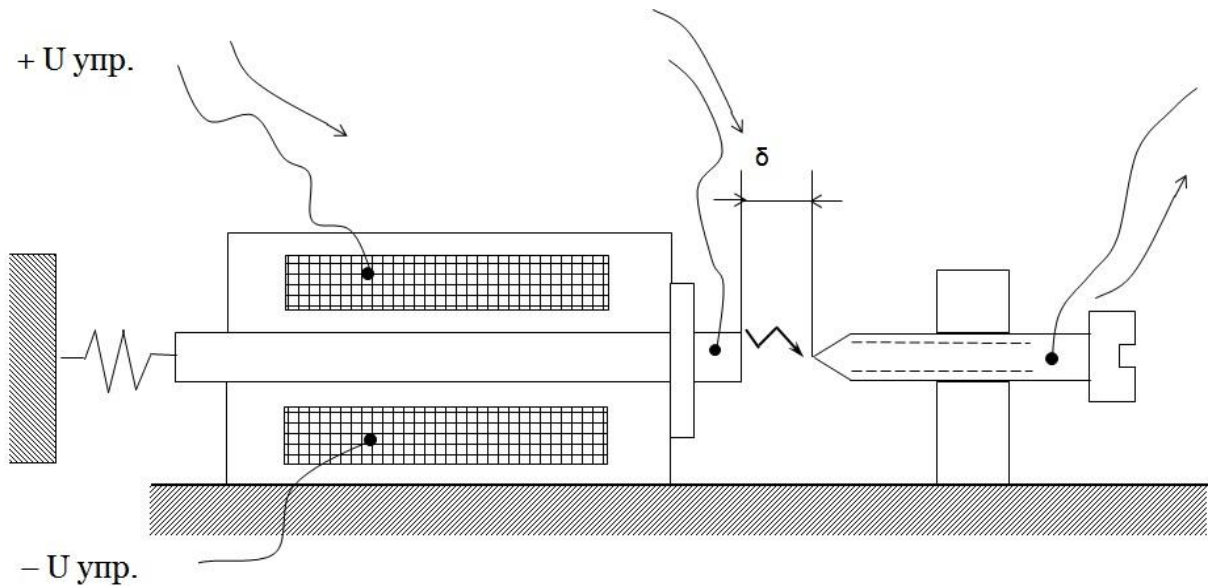
*Рис. 3.1.3 Осциллограмма тока хаотической прерывистой дуги в цепи ИВЭ РЭА, без защиты от переходных напряжений питания.*

Анализ осциллограмм позволяет сделать следующие выводы.

1. Процессы отражают хаотичные чередование трёх состояний:
  - наличие плотного контакта с малым сопротивлением;
  - разрыв цепи с нулевым током;
  - горение дуги с промежуточным уровнем тока.
2. Суммарное время горения дуги, измеренное в пределах контрольного интервала в 1 секунду, оказывается наименьшим в цепях с ИВЭ и КДПТ ввиду наличия ЭДС в составе их эквивалентных схем. Наибольшим оказывается время горения дуги в цепях с индуктивными нагрузками.
3. В цепях со стабилизированными ИВЭ ключевого типа, имеющими комплекс защит от понижения и повышения первичного напряжения, а также индуктивно-емкостные фильтры, могут наблюдаться только хаотические всплески зарядно-разрядных токов большой амплитуды без участков образования дуги и при отсутствии интервалов включения ИВЭ в нормальный рабочий режим.
4. В цепях со стабилизированными ИВЭ ключевого типа, имеющими индуктивно-емкостные фильтры, но без защит от понижения и повышения первичного напряжения, наблюдаются все возможные фазы процессов: хаотические всплески зарядно-разрядных токов большой

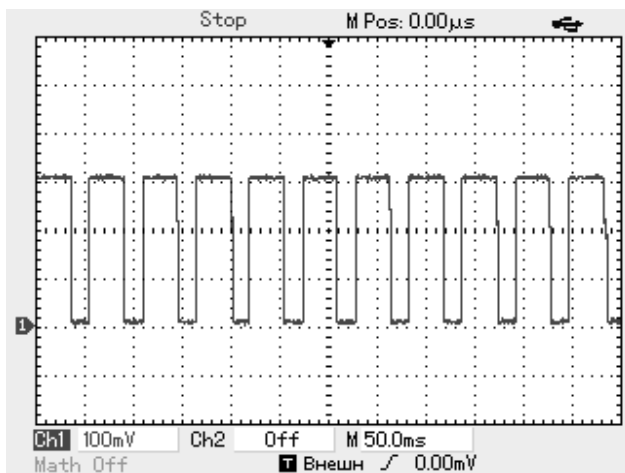
амплитуды, кратковременные участки горения дуги, провалы тока до нуля и интервалы нормальных рабочих режимов.

Для более детального изучения влияния внешних факторов на процессы в прерывистой дуге было решено организовать периодический режим коммутации воздушного промежутка и при этом стабилизировать величину зазора между электродами. Это выполняется на установке, схема которой приведена на рис 3.14. В основе устройства – электромагнит с цилиндрическим сердечником, механически связанным с подвижным контактом. В исходном состоянии сердечник оттянут влево до упора с помощью пружины и зазор полностью раскрыт. Неподвижный контакт в виде винта ввинчен в стойку, установленную на диэлектрическом основании устройства. Величина зазора устанавливается при отключённом электромагните вращением винта до упора в калиброванный по толщине металлический вкладыш, введённый в зазор. Далее вкладыш извлекается из зазора, а обмотка электромагнита включается к источнику переменного периодического прямоугольного напряжения. В силу электрической и механической инерционности электромагнитного привода приемлемая рабочая частота оказалась равной 20 Гц с коэффициентом заполнения импульсов  $K_3 = 0,6 \dots 0,7$ . Стенд можно использовать как в динамическом, так и в статическом режимах в отличие от описанных в зарубежной литературе устройств, приводимых в движение пневматическими цилиндрами, либо шаговыми электродвигателями.

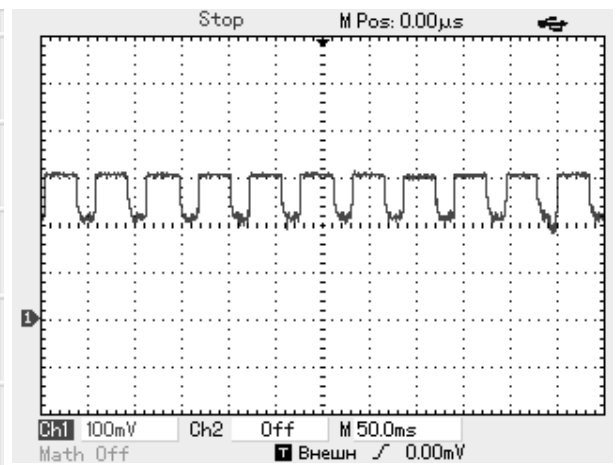


*Рис. 3.14. Схема стенда для создания дуги в контактном промежутке фиксированной длины.*

На рис. 3.15...3.18 приведены осциллограммы, отражающие влияние электрического характера нагрузок, материалов электродов, величины зазоров и напряжения источника питания на характер прерывистой дуги.

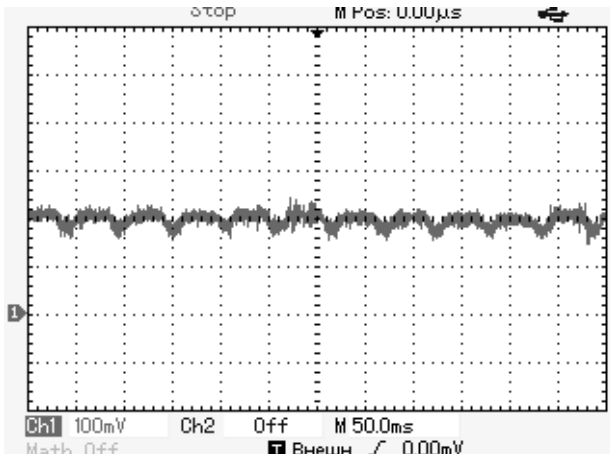


*Рис. 3.15. Ток прерывистой дуги в цепи с резистивной нагрузкой между медными контактами с зазором 0,2 мм и напряжением питания 30 В.*

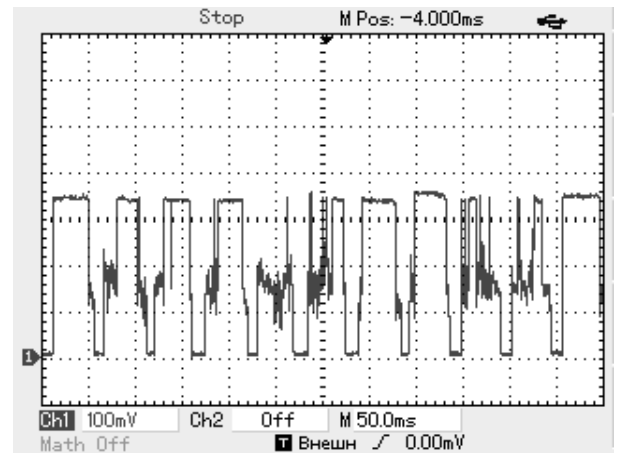


*Рис. 3.16. Непрерывный ток дуги в режиме периодического размыкания стальных контактов на частоте 20 Гц в цепи с RL-нагрузкой. Зазор 0,2 мм, напряжение 50 В.*





*Рис. 3.17. Ток прерывистой дуги в цепи с резистивной нагрузкой между латунными контактами с зазором 0,2 мм и напряжением питания 50 В.*



*Рис. 3.18. Ток прерывистой дуги в цепи с резистивной нагрузкой между алюминиевыми контактами с зазором 0,2 мм и напряжением питания 30 В.*

Выявлены четыре разновидности процессов.

1. Электрическая цепь полностью разрывается на каждом такте (рис. 3.15). Такое течение процессов наиболее вероятно при сочетании низкого напряжения питания, относительно большого зазора, резистивной нагрузки, алюминиевых или медных электродов.

2. Электрическая цепь не разрывается, несмотря на периодические механические разрывы между электродами. Дуга горит постоянно, либо с промежутками (рис. 3.16). Это наиболее вероятно при сочетании повышенного напряжения, малого зазора, индуктивной нагрузки, латунных, либо стальных электродов.

3. Электрическая цепь не разрывается, но ток нагрузки пульсирует между исходным значением и некоторым промежуточным уровнем, отличным от нуля (рис. 3.17). Процесс наиболее вероятен при повышенном напряжении, малом зазоре, R и RL нагрузках, электродах из стали или латуни.

4. Ток нагрузки хаотически изменяется между исходным уровнем, уровнем горения дуги и нулевым значением (рис. 3.18). Такой режим возникает из предыдущих при изменении одного из параметров: напряжения питания, зазора, либо материала электродов.

Во всех четырёх вариантах отмечается фаза периодического или хаотического по частоте уменьшения тока с исходного уровня до уровня горения дуги, что может быть критерием наличия дуги прерывистого типа. Исключением является непрерывный процесс на рис. 3.16, который являясь частным случаем устойчивой дуги, предполагает наличие дополнительных технических средств для её индикации.

### 3.3 Вольтамперная характеристика дуги.

Электрические свойства дуги в установившихся режимах описываются её вольтамперной характеристикой (ВАХ), имеющей вид гиперболы (рис. 3.19). В цепи с источником постоянного напряжения и ограничительным резистором  $R_{огр}$  точка устойчивого горения дуги соответствует положению «В» на нижнем пересечении ВАХ дуги и прямой, соответствующей сопротивлению ограничительного резистора. При уменьшении  $R_{огр}$  минимальный ток устойчивой дуги соответствует точке «С».

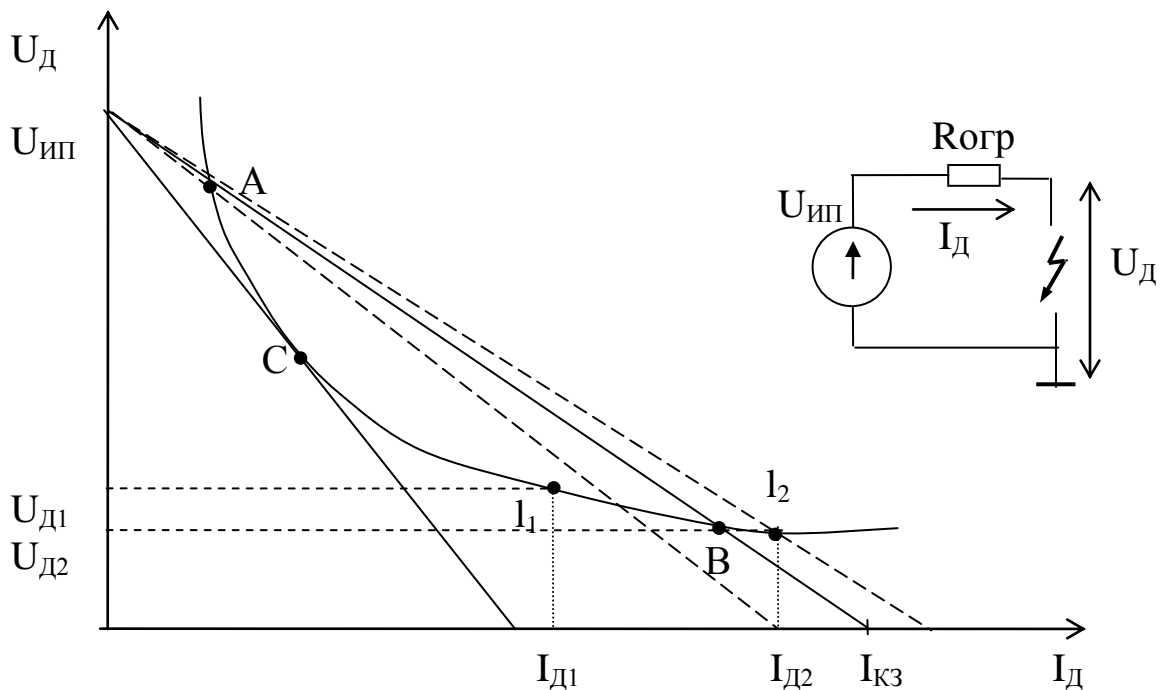


Рис. 3.19. Вольт-амперная характеристика дуги.

Для описания ВАХ часто используют модель Айртона:

$$U_{д} = a + bl + (c + dl) / I_{д};$$

где:  $U_D, I_D$  – напряжение на дуге и ток через дугу,  $l$  – расстояние между электродами,  $a, b, c, d$  – экспериментальные константы, характеризующие материал электродов, давление среды и др.

При фиксированном расстоянии между электродами имеем:

$$U_D = A + B/I_D, \text{ где } A = a + bl, B = c + dl$$

Значения  $A$  и  $B$  можно определить из экспериментальных данных двух электрических измерений токов и напряжений в двух точках характеристики ( $l_1$  и  $l_2$ ):

$$A = (U_{D1} * I_{D1} - U_{D2} * I_{D2}) / (I_{D1} - I_{D2}); B = (U_{D1} - U_{D2}) * I_{D1} * U_{D2} / (I_{D2} - I_{D1})$$

Недостатком модели Айртон является тот факт, что при нулевых зазорах (когда дуга гаснет) в уравнении сохраняется напряжение на дуге. В работе [13] анализируется возможность использования более поздней модели Целлера [7]:

$$E(t) = K_{PC} / (I_A(t) - I_0) + K_{PEL} / (L_A(t) - L_0)$$

где:  $K_{PC}, K_{PEL}$  – экспериментальные параметры, причём  $K_{PC}$  отражает мощность потерь в столбе дуги, а  $I_0$  и  $l_0$  введены для того, чтобы избежать деления на ноль при нулевом зазоре. Напряжение на дуге может быть записано как:

$$U_D = E(t) * I_A(t) + U_{AK}$$

где:  $U_{AK}$  – суммарное падение напряжения вблизи анода и катода (т.е. минимальное напряжение на дуге), предположительно независимое от тока и от длины зазора.

Отметим, что предлагаемые количественные описания ВАХ дуги могут быть приняты только в качестве среднестатистических, поскольку экспериментальные параметры, входящие в модели, подвержены хаотическим изменениям от замера к замеру. В связи с этим поставим себе задачу оценить минимальные значения напряжений на устойчивой дуге в функции от материалов электродов, что позволит определить достоверные

минимальные относительные изменения токов при появлении дуги и использовать затем факт этих изменений как средство её индикации.

Для экспериментальных измерений параметров ВАХ устойчивой дуги был использован стенд с электромагнитным приводом, приведённый на рис.

3.14. Ток через дугу задавался одним из двух способов:

- от источника постоянного напряжения 40...50 В через транзисторный регулируемый ограничитель тока, работающий в непрерывном режиме (рис. 3.20);
- от источника постоянного напряжения 25...30 В через транзисторный регулируемый ограничитель тока, работающий в релейном режиме (рис. 3.21).

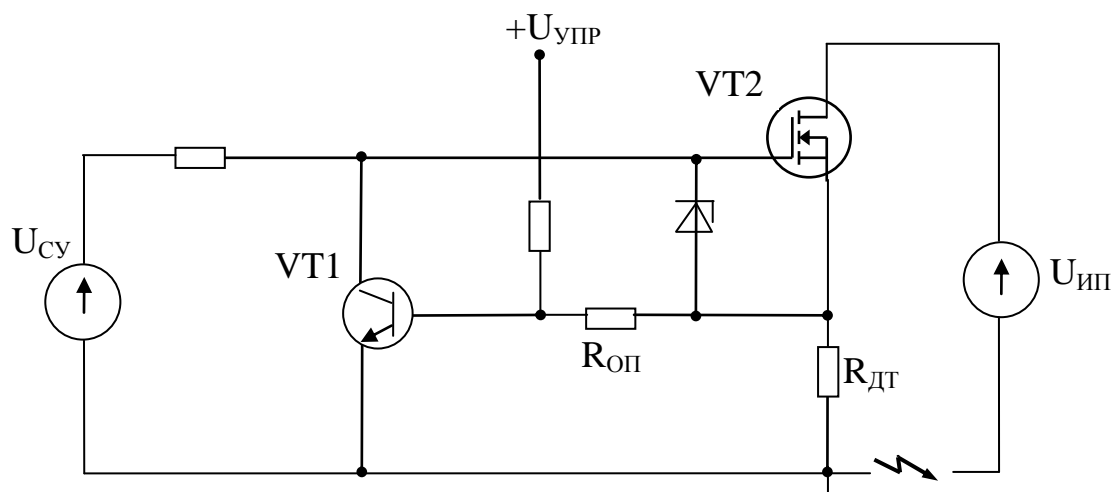


Рис. 3.20. Схема непрерывного ограничителя тока дуги.

Первая схема содержит силовой МДП транзистор VT2, работающий в активном режиме, резистивный датчик тока  $R_{ДТ}$ , усилитель цепи отрицательной обратной связи на VT1 и источник напряжения  $U_{УПР}$ , управляющий уровнем тока в силовой цепи путём изменения опорного напряжения на резисторе  $R_{ОП}$ . Достоинство схемы – отсутствие пульсаций в создаваемом силовом токе. Недостаток – пассивный характер ограничения тока, что вынуждает увеличивать напряжение питания.

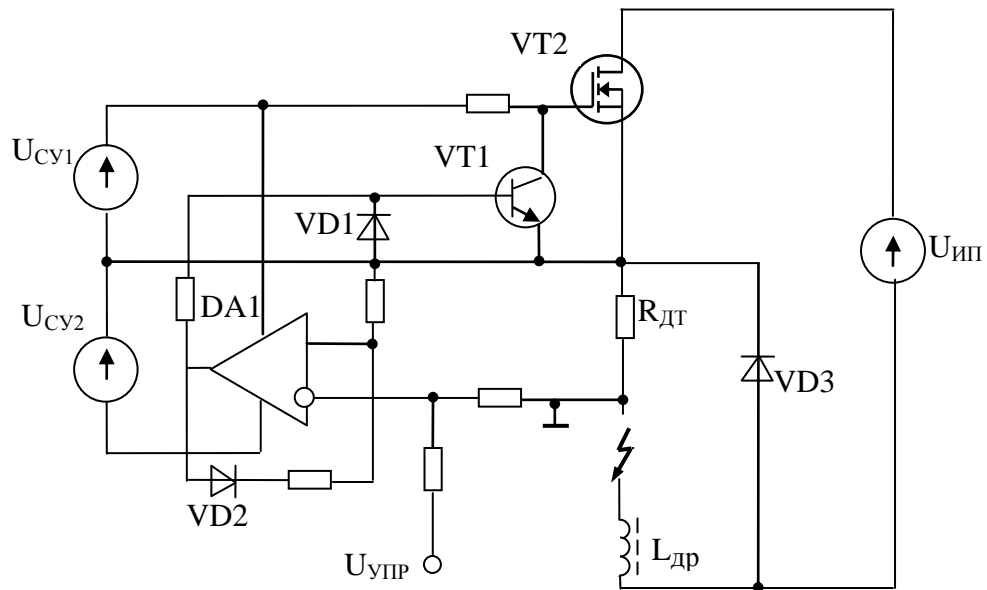


Рис. 3.21. Схема импульсного ограничителя тока дуги.

Вторая схема содержит силовой МДП ключ, накопительный дроссель с большой индуктивностью, блокирующий диод VD3, датчик тока дросселя  $R_{дт}$  и полупроводниковое реле на операционном усилителе DA1.

Достоинство схемы – активный характер ограничения тока, когда в цепь нагрузки передаётся энергия, накопленная в электромагнитном поле дросселя. Это позволяет уменьшить напряжение питания и растянуть диапазон исследуемых токов в сторону малых значений.

Обе схемы позволили исключить из силовой цепи конкретные нагрузки (с их влиянием на характер тока) и проводить измерения в режиме коротких замыканий нагрузочных цепей. Испытания показали практически полное совпадение результатов измерений напряжений на устойчивой дуге при задании одинаковых токов от непрерывного и импульсного ограничителей.

Измерения параметров ВАХ проводились в статическом режиме устойчивой дуги. По данным [40] номинальные токи 70...80 % потребителей электроэнергии авиационных низковольтных СЭС постоянного тока оказываются менее 10 А. Устойчивое горение дуги при таких уровнях тока и в нормальных атмосферных условиях наблюдается при расстояниях между электродами не более 0,5...1,0 мм.

На рис. 3.22...3.25 приведены итоговые ВАХ дуговых разрядов, снятые при различных материалах электродов и различных зазорах в схемах с непрерывным, либо импульсным ограничением токов. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

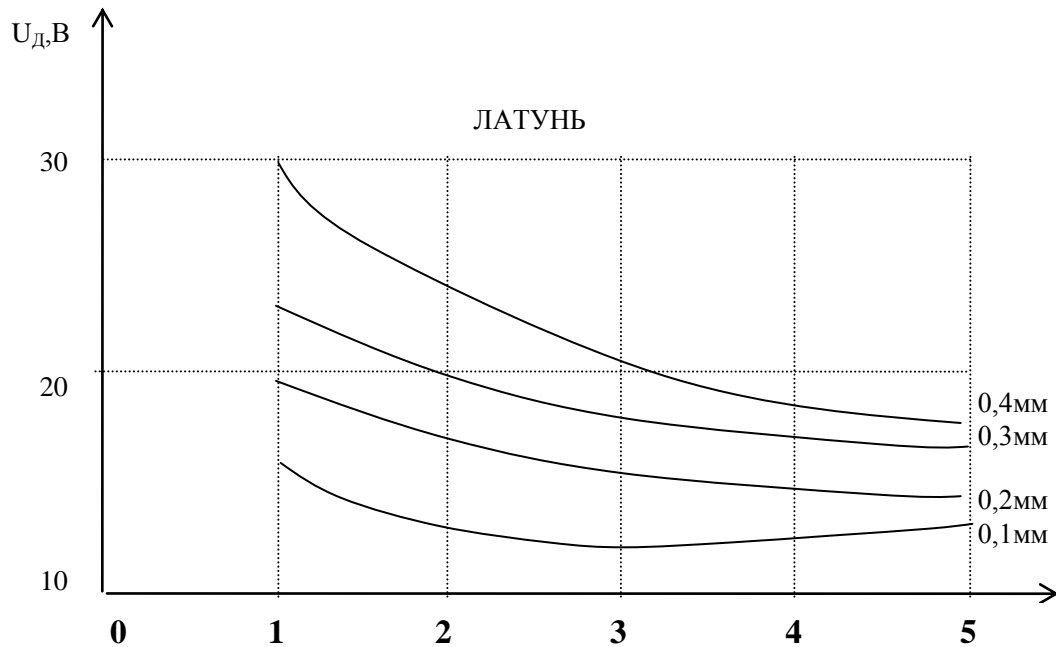


Рис. 3.22. Вольт-амперные характеристики дуги между латунными электродами с различными зазорами (в мм).

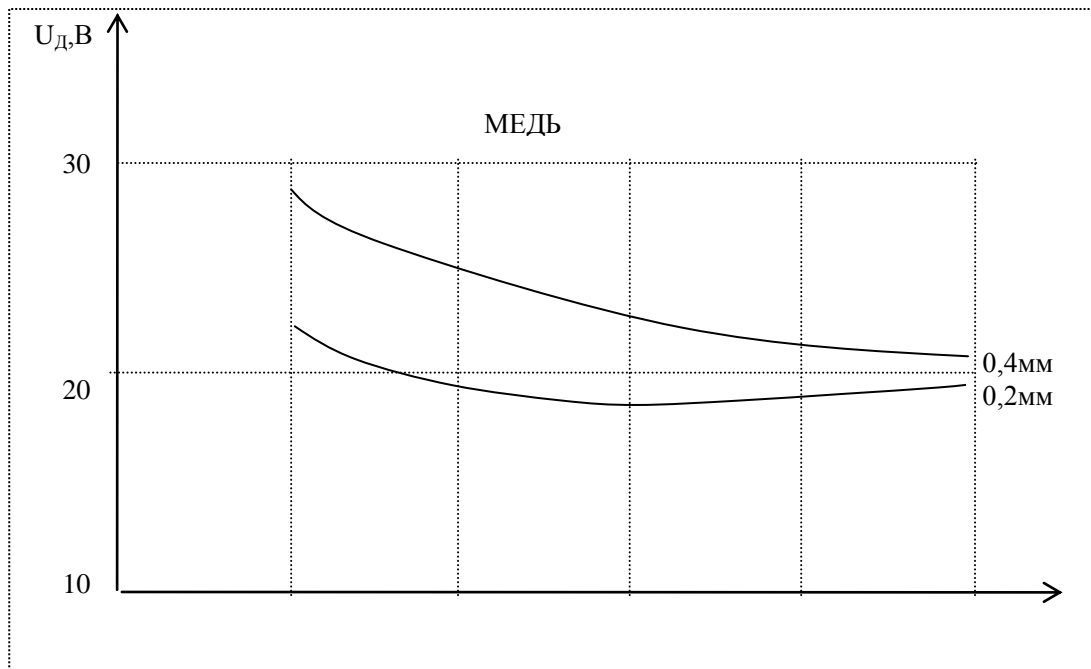
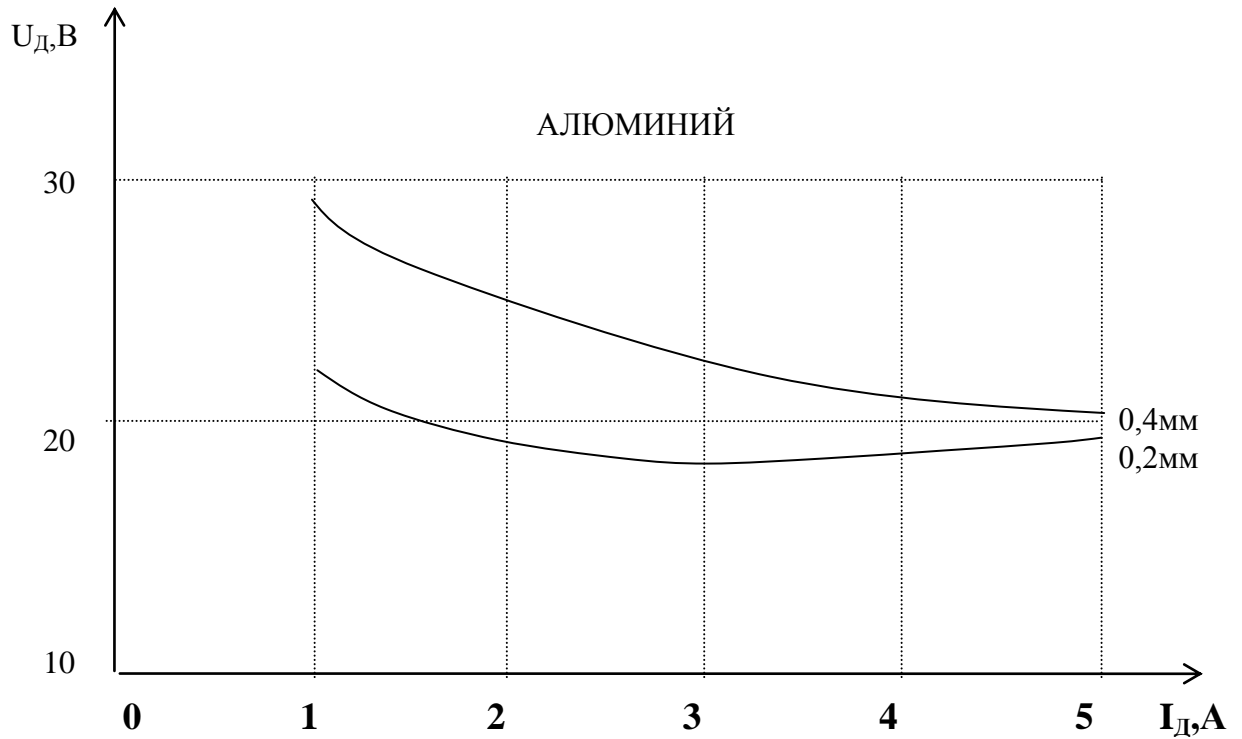
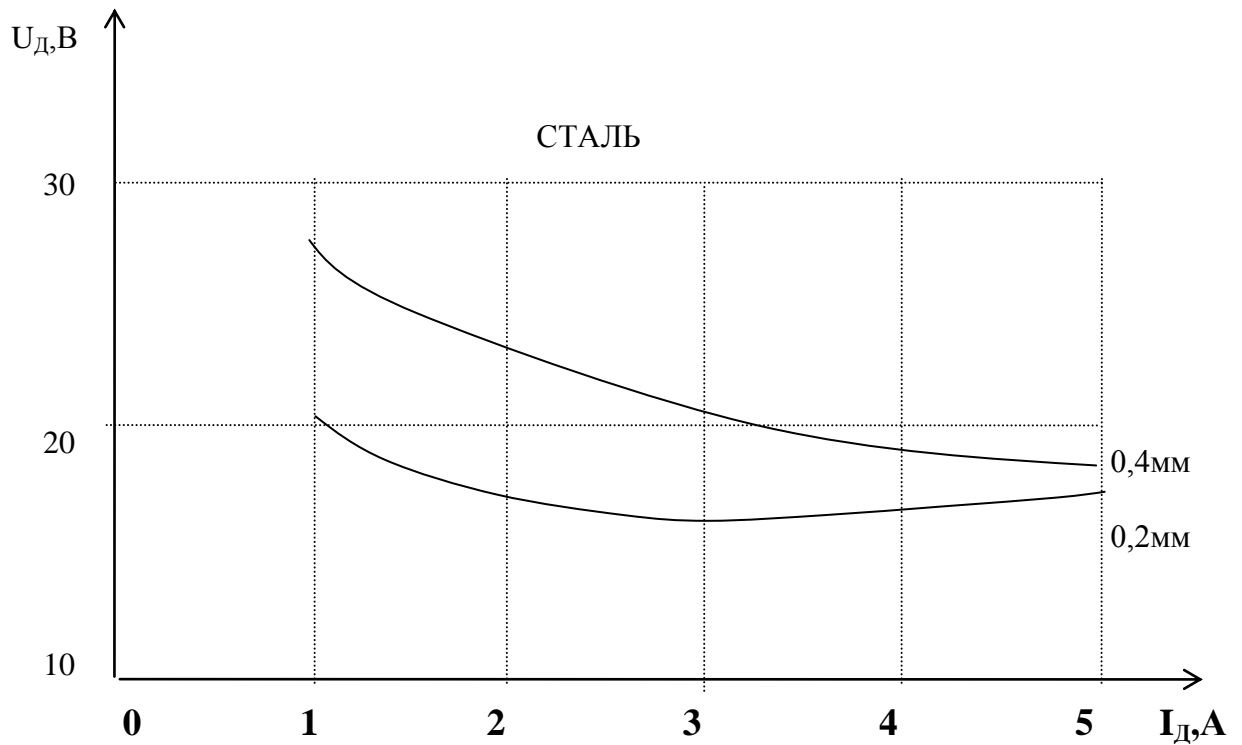


Рис. 3.23. Вольт-амперные характеристики дуги между медными электродами с различными зазорами (в мм).



*Рис. 3.24. Вольт-амперные характеристики дуги между алюминиевыми электродами с различными зазорами (в мм).*



*Рис. 3.25. Вольт-амперные характеристики дуги между стальными электродами с различными зазорами (в мм).*

1. Максимальные падения напряжения на дуге при токах 3...5 А обнаружены между алюминиевыми и медными электродами и составляют в среднем 17,5...18,5 вольт при токе 3 А и зазоре 0,2 мм. Далее в порядке убывания следуют напряжения на стальных и латунных электродах (14...15 В).

2. При малых зазорах (0,1...0,2 мм) ВАХ дуги приобретают участки с оптимальной зависимостью напряжения от тока, выявленные для всех материалов, использованных в экспериментах, что может быть связано с увеличением доли резистивной составляющей в напряжении дуги на фоне уменьшения плазменной составляющей короткого столба.

3. При номинальном напряжении сети 27 В степень уменьшения напряжения на нагрузке и тока в цепи за счёт потерь напряжения на возникшей дуге зависит от материала электродов и составляет 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, не связанных с колебаниями напряжения сети.

#### ***3.4 Исследование пульсаций тока дуги.***

Основная цель такого исследования – оценка размаха пульсаций тока дуги в цепях с типовыми нагрузками низковольтных СЭС как основы способа индикации дуги по возникшим дополнительным пульсациям на фоне нормализованных сетевых помех.

Первоначально возникновение и развитие последовательной дуги и изучение её пульсаций наблюдалось на лабораторной установке, содержащей неподвижный и подвижный электроды, закреплённые на керамических изоляторах [43]. Перемещение подвижного электрода осуществлялось вручную с помощью микрометрического винта. В качестве сменных электродов использовались:

- два одинаковых стальных шарообразных электрода диаметром 20 мм;



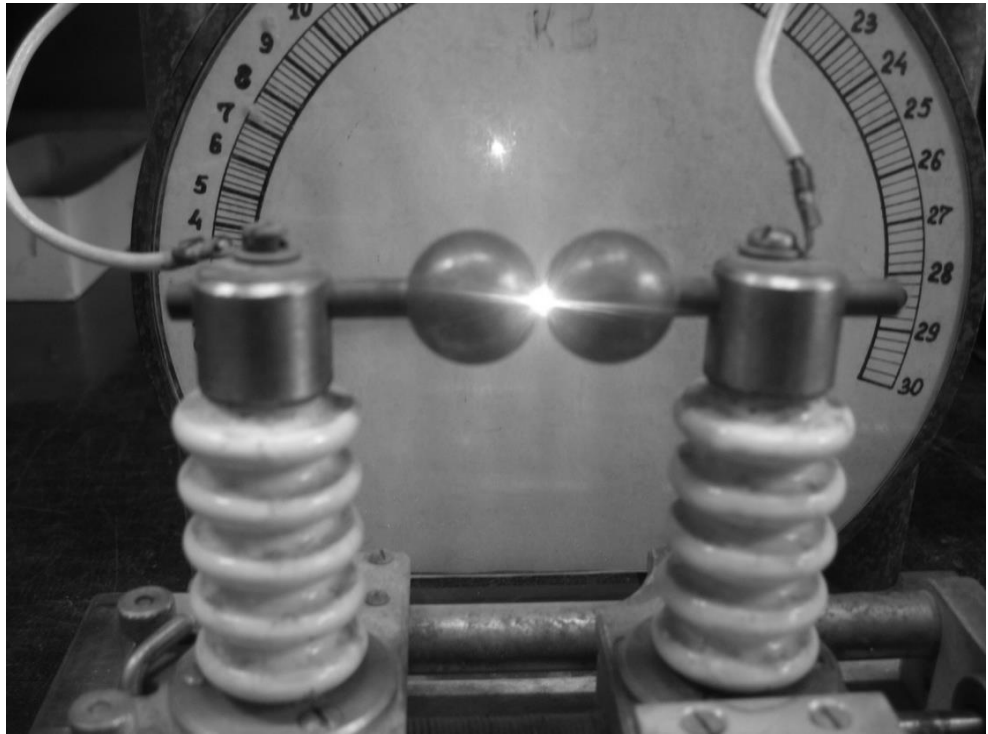
- два одинаковых латунных цилиндрических электрода диаметром 5 мм с плоскими торцами;
- комбинация из цилиндрического и конического латунных электродов диаметром 5 мм;
- две части рассечённого надвое авиационного провода с внешним диаметром 5 мм.

Исследования показали, что массивные шаровые электроды обеспечивают стабильное горение дуги в течение десятков секунд, однако из-за хорошего теплоотвода от дуги сила тока в цепи должна быть не менее 3...5 А. Наименьшее значение тока в дуге (1...2 А) было получено в комбинации цилиндрического и конического электродов, однако электроды быстро разрушались, а сам процесс горения был неровным. Самая нестабильная во времени дуга была получена в комбинации из двух частей рассечённого провода из-за непрерывного перемещения столба дуги с одного проводника многожильного провода на другой.

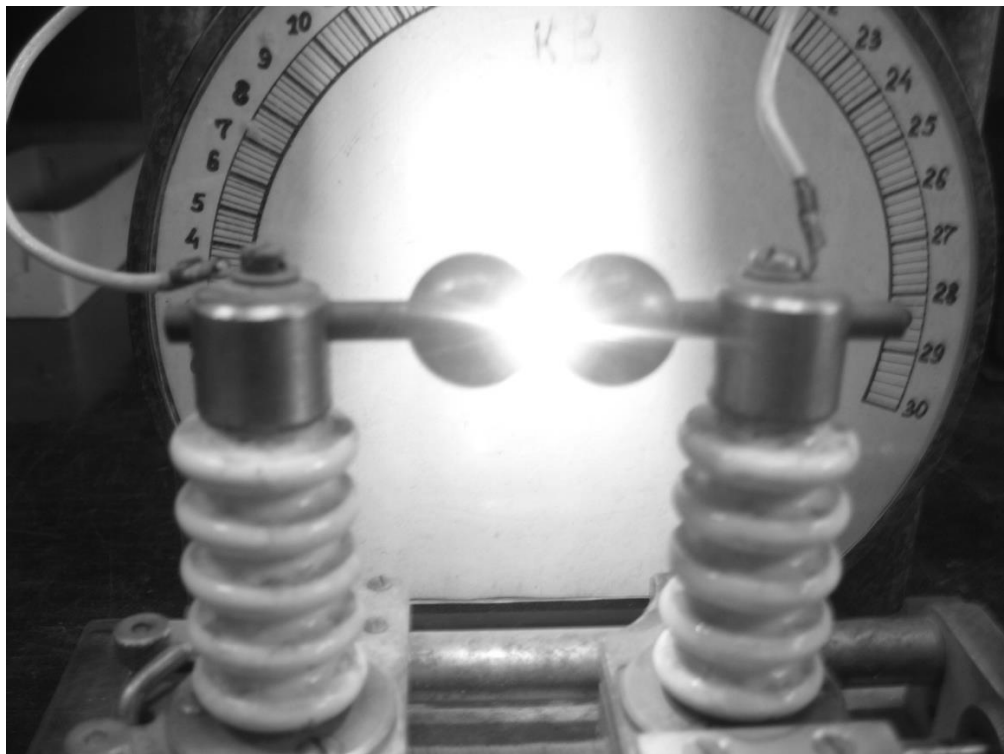
В ходе экспериментов наблюдались две разновидности разрядов:

1. оранжево-жёлтый разряд, стабильно возникавший между стальными шаровыми электродами в начальной фазе горения, когда межэлектродный промежуток разогревается тепловыми потерями в тонком слое окисла, покрывающего электроды (рис. 3.26); яркость разряда возрастает по мере увеличения межэлектродного промежутка, окраска разряда постепенно светлеет; внезапно наступает вторая стадия горения и образуется дуговой столб голубого цвета;

2. яркая дуга голубого цвета, возникавшая после продолжительного и стабильного разряда жёлтого цвета между шаровыми электродами, либо практически сразу в начале отрыва конического контакта от цилиндрического (рис. 3.27); горение «голубой» дуги сопровождается характерным треском.



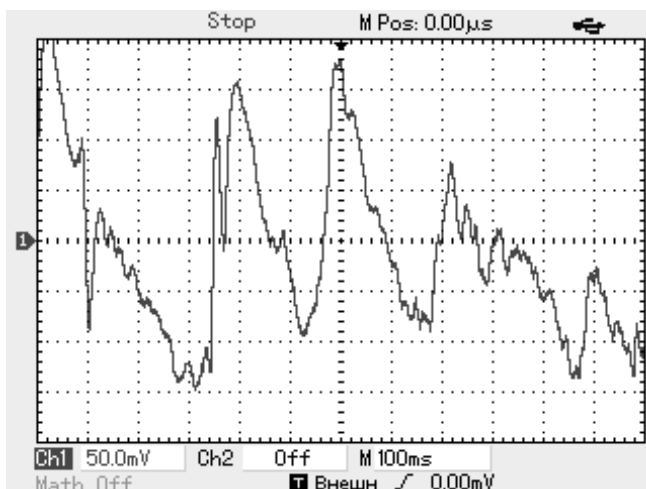
*Рис. 3.26. Оранжево-жёлтый разряд между шаровыми электродами.*



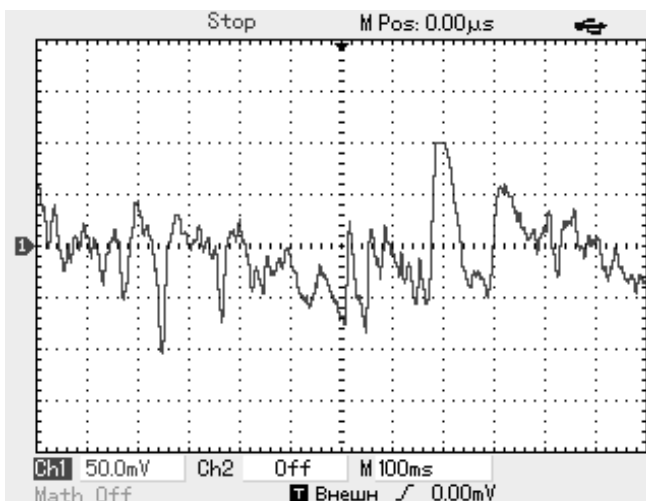
*Рис. 3.27. Голубая дуга между шаровыми электродами.*

Падение напряжения на межэлектродном промежутке при «жёлтом» разряде составляет 2...6 В, так что ток резистивно-активной нагрузки уменьшается несильно. Падение напряжения на столбе «голубой» дуги составляет 10...15 В, что вызывает уменьшения тока нагрузки на 30...50 %.

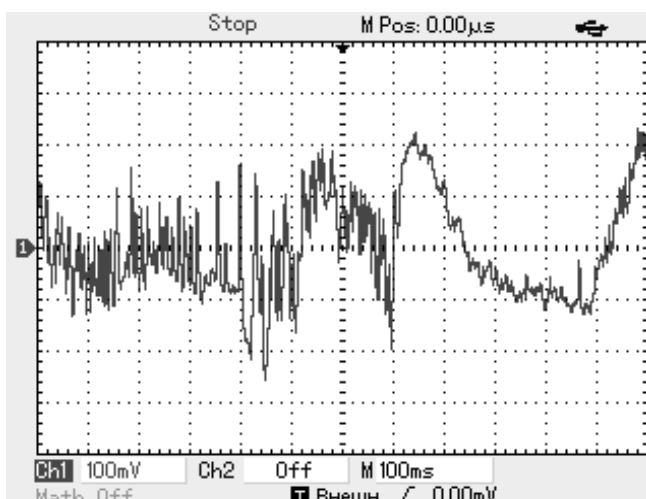
На рис. 3.28...3.33 приведены экспериментально полученные осциллограммы пульсаций токов в дуге при нагрузках различного характера.



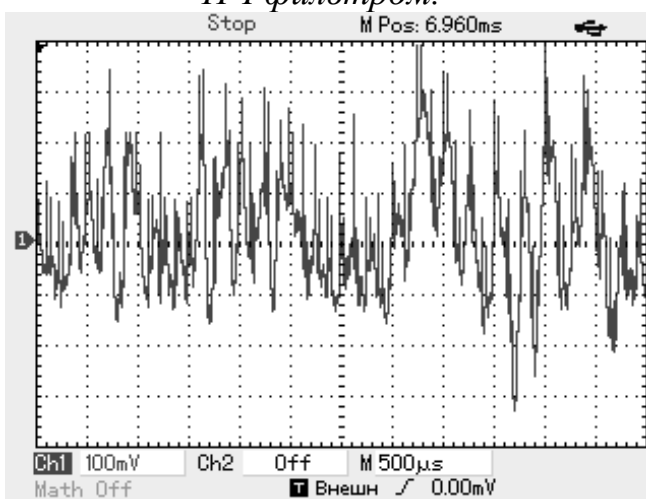
*Рис. 3.28. Пульсации тока в дуге при RL нагрузке напряжения сети 40 В, с усилителем и НЧ фильтром.*



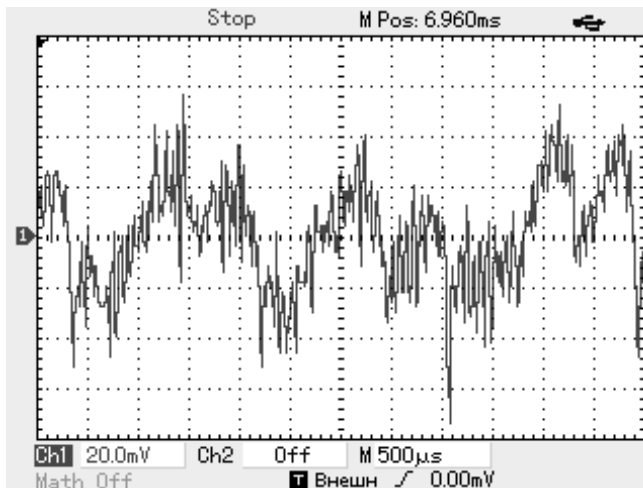
*Рис. 3.29. Пульсации тока в фазе жёлтого разряда при RL нагрузке напряжения сети 40 В, с усилителем и НЧ фильтром.*



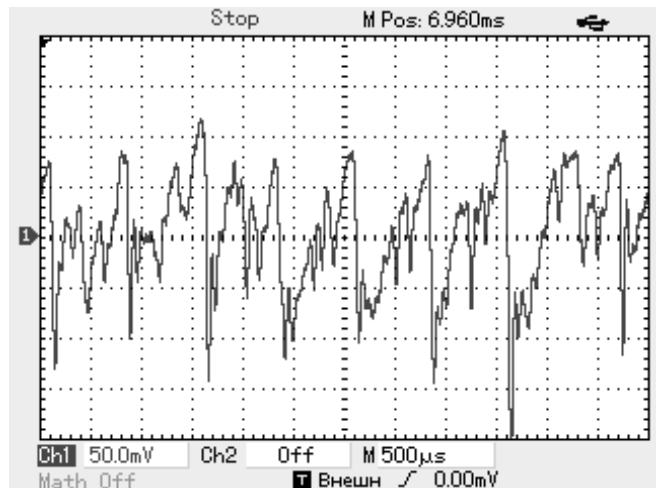
*Рис. 3.30. Пульсации тока в дуге при ламповой нагрузке, напряжении сети 40 В, с усилителем и НЧ фильтром.*



*Рис. 3.31. Пульсации тока в дуге при стабилизированном транзисторном ключевом ИВЭ в качестве нагрузки, напряжении сети 40 В, с усилителем и НЧ фильтром.*



*Рис. 3.32. Пульсации тока в дуге при электродвигательной нагрузке, напряжении сети 40 В, с усилителем и НЧ фильтром.*



*Рис. 3.33. Пульсации тока в коллекторном электродвигателе при напряжении сети 27 В, с усилителем и НЧ фильтром.*

Датчиком тока при осциллографировании служил безындуктивный низкоомный (0,1 Ом) резистор. Переменная составляющая напряжения с датчика тока усиливалась в 10 раз. Таким образом, значения напряжения по оси ординат на осциллограммах численно соответствуют величине пульсаций тока в дуге (в миллиамперах). Для увеличения устойчивости дуги в экспериментах напряжение сети было увеличено до 40 В.

На рис. 3.28 приведена картина пульсаций тока дуги при RL нагрузке ( $I_H = 3$  А, шаровые электроды). Изменение тока носит хаотичный характер. Максимальная амплитуда пульсаций тока составляет 200 мА (т.е. примерно 70 мА на один ампер номинального тока). Максимальные пульсации тока соответствуют частотному диапазону 2,5...3,5 Гц, минимальные различимые пульсации в единицы миллиампер соответствуют частотам в десятки герц. На рис. 3.29 – осциллограмма, полученная при тех же условиях но в фазе «жёлтого свечения». Хаотичность сохранилась, но амплитуда стала примерно вдвое меньше, а частота возросла.

На рис. 3.30 приведена картина пульсаций при дуге в цепи с авиационными лампами накаливания. При напряжении 40 В цепь нагрузки была составлена из двух последовательно соединённых ламп типа КГСМ 27-85 во избежание их перекаливания ( $I_H = 2,5$  А, шаровые электроды). В

отсутствие индуктивности нагрузки частота пульсаций заметно увеличилась и на первом отрезке процесса составила 50...100 Гц при амплитуде около 40 мА на один ампер условно номинального тока. Максимальная амплитуда пульсаций на заключительном отрезке процесса составляет 80 мА/А при частоте 2 Гц.

На рис. 3.31 приведена картина дуги, полученная в цепи с транзисторным стабилизированным источником вторичного электропитания в качестве нагрузки ( $I_H = 3$  А, цилиндрический и конический электроды). Транзисторный стабилизированный ИВЭ, встроенный в РЭА, является для сети нагрузкой емкостного характера, поскольку питающие цепи современных ключевых ИВЭ содержат индуктивно-емкостные фильтры с преобладанием емкостной составляющей. Конденсаторы фильтров заряжаются от сети практически до напряжения питания и при разрыве питающего провода дуга может не возникнуть из-за нехватки напряжения на воздушном промежутке. Чем больше ёмкость конденсатора, тем менее вероятна дуга. В экспериментах ёмкость конденсатора выбиралась из расчёта 200...300 мкФ/А, что характерно для ИВЭ с низковольтным входом. Для облегчения условий возникновения дуги ИВЭ был спроектирован как понижающий импульсный стабилизатор с низким выходным напряжением (12...15 В), чтобы обеспечить его функционирование от входного напряжения  $U_{ВХ.ИВЭ} = U_{СЕТИ} - U_{ДУГИ} \approx 15...20$  В. Анализ полученной осциллограммы показывает, что максимальная частота пульсаций тока дуги составила 10 кГц, а амплитуда пульсаций на этой частоте – 30 мА/А. На частоте 4 кГц амплитуда пульсаций – 90 мА/А.

На рис. 3.32 приведена осциллограмма тока в дуге с электродвигательной нагрузкой. В качестве нагрузки был использован авиационный электромашинный преобразователь питания авиагоризонта типа ПАГ 1Ф с приводным коллекторным электродвигателем ( $I_H = 4...5$  А). Отметим, что ЭДС вращения двигателя ( $E_{ДВИГ}$ ) препятствует возникновению дуги, поскольку напряжение в месте разрыва, которое составляет:  $U_{РАЗР.} =$

$U_{СЕТИ} - E_{ДВИГ.}$ , может оказаться меньше, чем требуется для горения дуги. Наличие индуктивности якоря машины, наоборот, способствует возникновению дуги. Для облегчения зажигания дуги преобразователь был нагружен со стороны его генератора, с тем, чтобы уменьшить ЭДС вращения. Анализ полученной осциллограммы даёт следующие результаты. Максимальная частота пульсаций тока дуги составляет 10 кГц, а амплитуда пульсаций на этой частоте – 4...5 мА/А. На частоте 500...600 Гц амплитуда пульсаций – 8...10 мА/А.

На рис. 3.33 приведена осциллограмма пульсаций тока коллекторного электродвигателя в неповреждённой цепи, т.е. при отсутствии дуги. Обращает на себя внимание хаотичность пульсаций, свойственная нерегулярным системам, что возможно указывает на наличие слабых разрядных явлений в коллекторном узле машины, которые визуалью не наблюдаются.

Особую группу составляют так называемые импульсно-периодические нагрузки (ИПН). По определению ГОСТ Р 54073-2010 это «нагрузки, периодически плавно, или ступенчато изменяющаяся через равные интервалы времени с частотой 0,5...400 Гц и скважностью более единицы». Импульсно-периодическое изменение тока не должно быть больше 2 А. Можно предположить, что в самолётных системах к таким нагрузкам относятся устройства коммутации внешней светотехники в проблесковых режимах, импульсные противообледенительные устройства, системы зажигания в режимах запусков, вентиляторы на шаговых электродвигателях и др. К этому виду нагрузок не относятся ИВЭ РЭА, работающие на повышенных частотах и блоки накачки накопительных конденсаторов, потребляющие ток непрерывно. Если ток только пульсирует, но не прерывается, возникшая дуга также не будет прерываться, а параметры тока в дуге сохранят ранее рассмотренные качественные особенности в зависимости от характера нагрузки. Если же ток ИПН прерывается, то дуга, возникшая во время импульса, может прерваться в паузе и более не

загореться, если пауза достаточно продолжительна для спада тока и деионизации промежутка. На рис. 3.34 приведена схема лабораторного макета для исследования условий гашения дуги при резистивной ИПН (авиационные лампы). Проводимость цепи нагрузки периодически изменяется транзисторным ключом. Регулируется уровень тока в паузах. Установлено, что в диапазоне частот 0,5...400 Гц, характерных для ИПН при скважности, равной двум, голубая дуга, изначально сформированная на постоянном токе, гаснет затем при создании режима ИПН, если ток в паузе не превышает 10 % от первоначально установленного постоянного тока.

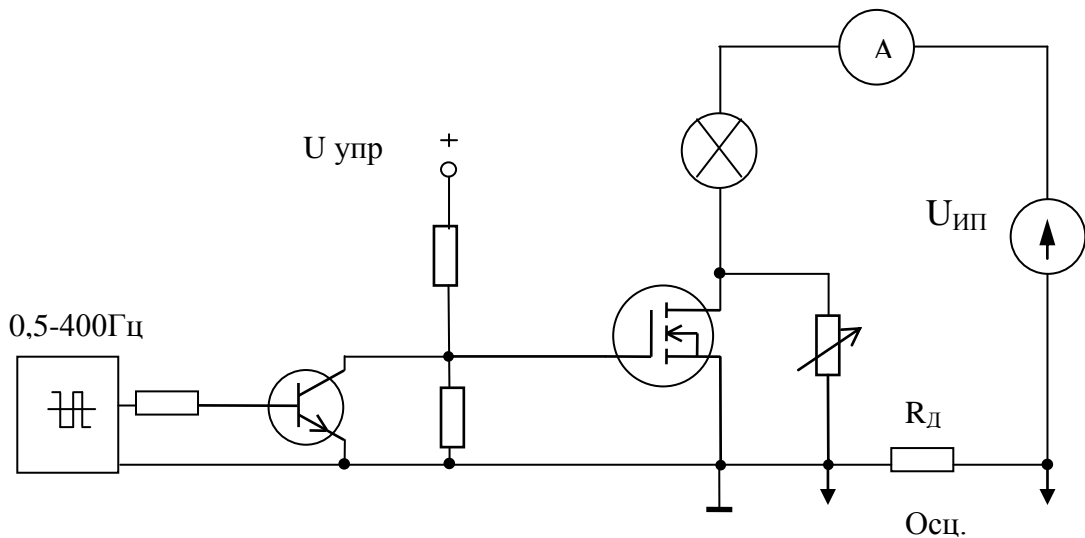


Рис. 3.34. Схема макета для исследования условий гашения дуги при импульсно-периодической нагрузке.

Если же скважность импульсов произвольна, то граничное значение коэффициента заполнения импульсов  $K_{з.гр.}$ , больше которого сохраняется дуга, определяется следующим соотношением:

$$K_{з.гр.} = 1 - T_{дд} * f ;$$

где  $T_{дд}$  – время деионизации дуги,  $f$  – частота следования импульсов.

Дополнительные исследования характера пульсаций тока дуги и выявление влияния внешних факторов на размах пульсаций были проведены в схемах коммутации нагрузок контактами реле и электродами электромагнитного стенда с нормированными зазорами.

Сформулируем выводы, обобщающие результаты ранее описанных и дополнительно проведённых экспериментов.

Пульсации напряжения дуги, вызванные флуктуациями сопротивления плазменного столба, могут быть охарактеризованы как действие некоторого эквивалентного генератора хаотичного переменного напряжения. На рис 3.35 приведены осциллограммы пульсаций тока и напряжения дуги в цепи с резистивной нагрузкой при среднем токе нагрузки 3 А и напряжении источника питания 40 В. Осциллограммы получены на стенде рис. 3.14. Информация о токе снимается с резистивного датчика сопротивлением 0,1 Ом и после выделения переменной составляющей усиливается в 10 раз. Информация о напряжении снимается с дугового промежутка, ослабляется резистивным делителем в 100 раз, проходит через фильтр, затем усиливается в 10 раз. В итоге милливольты напряжения на экране осциллографа в канале тока количественно совпадают с миллиамперами пульсаций тока в цепи, а показания пульсаций напряжения меньше реальных пульсаций дуги в 10 раз. Сопоставление осциллограмм напряжения и тока обнаруживает, что они зеркальны, поскольку изменения тока в цепи с резистивной нагрузкой задаются изменениями напряжения.

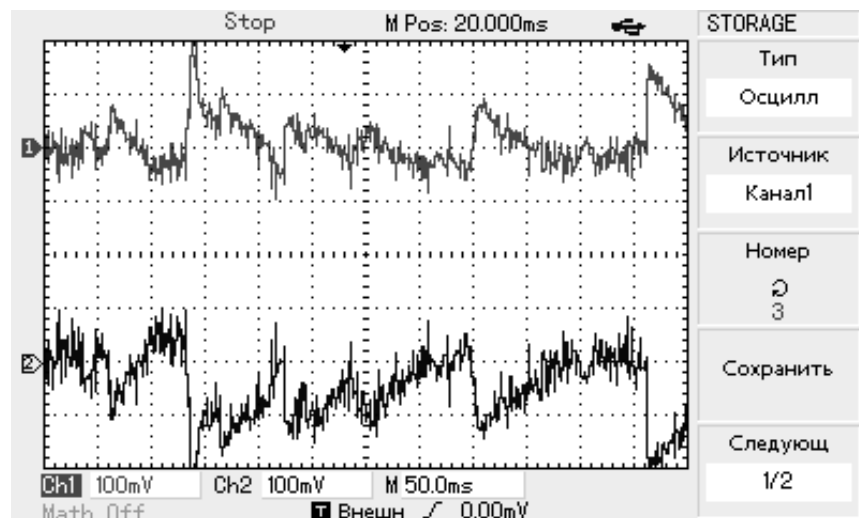


Рис. 3.35. Пульсации тока дуги (вверху) и напряжения на дуге (внизу) в цепи с резистивной нагрузкой.



Максимальный размах пульсаций тока составляет 300 мА, или 10 % от среднего тока нагрузки. Максимальный размах пульсаций напряжения составляет 3 В или 20 % от среднего напряжения на дуге.

На рис 3.36 приведены осциллограммы тока и напряжения дуги в цепи с RL нагрузкой (ток нагрузки – 3 А, напряжение питания – 40 В). Размах пульсаций напряжения сохранился. Относительный размах пульсаций тока уменьшился до 5 %. Кроме того фильтрующее действие RL нагрузки ослабило высокочастотные составляющие в токе, но в напряжении они сохранились.

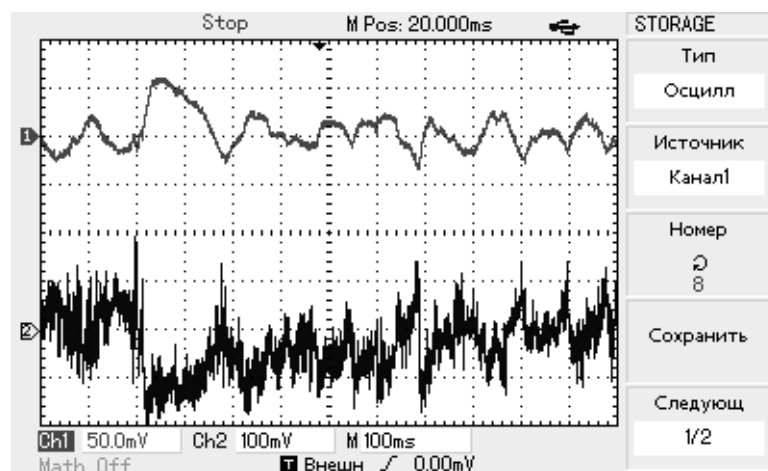


Рис. 3.36. Пульсации тока и напряжения дуги в цепи с RL нагрузкой.

На рис. 3.37 приведены осциллограммы тока и напряжения дуги в цепи с RC нагрузкой (ток нагрузки – 3 А, напряжение питания – 40 В). Размах пульсаций напряжения уменьшился до 10 %. Относительный размах пульсаций тока увеличился до 15 %.

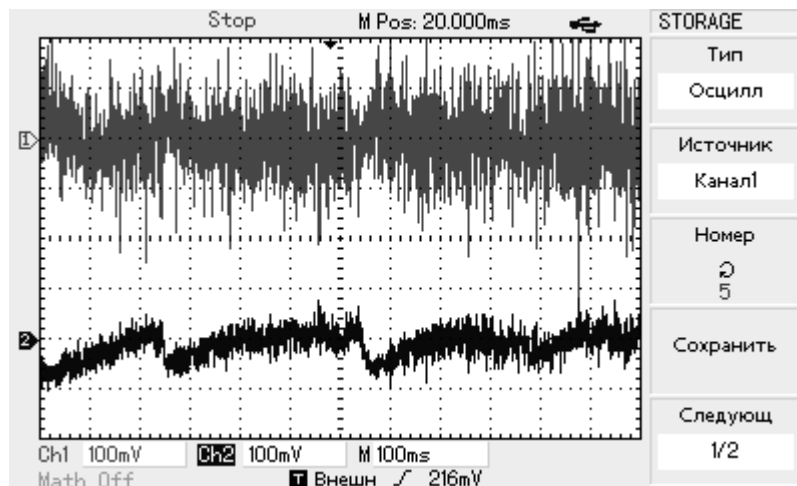
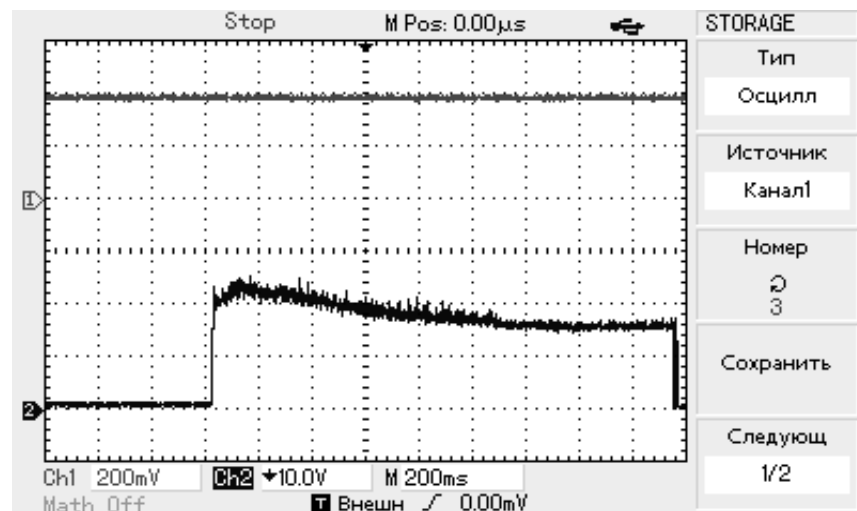


Рис. 3.37. Пульсации тока и напряжения дуги в цепи с RC нагрузкой.

Таким образом, при равных средних токах нагрузок размах пульсаций тока минимален в цепях с индуктивными, а максимален в цепях с емкостными нагрузками. Спектр «индуктивных» токов сдвинут влево, а «емкостных» – вправо относительно спектра «резистивных» токов

2. Размах пульсаций тока и напряжения дуги не остаётся постоянным в ходе развития дугового разряда. Это подтверждается осциллограммой на рис. 3.38, полученной при разрыве цепи с непрерывным ограничителем тока контактами реле при напряжении 40 В и исходном токе 4 А. Наибольшим размах пульсаций оказывается в начале процесса. Далее по мере разогрева плазмы пульсации уменьшаются. Отсюда рекомендации некоторых исследователей проектировать устройства индикации в расчёте на начальные временные фазы дуги.



*Рис. 3.38. Уменьшение размаха пульсаций напряжения на дуге в ходе её развития.*

3. Размах пульсаций тока дуги непропорционален её среднему току. Для цепи с резистивной нагрузкой при токах 3...6 А размах пульсаций тока дуги в середине выбранного диапазона оказывается меньшим, чем на его краях (рис. 3.39...3.41). Данная особенность затрудняет масштабирование опорных уровней схем защиты, основанных на индикации размаха пульсаций, при необходимости перестроить их на другой номинал тока.

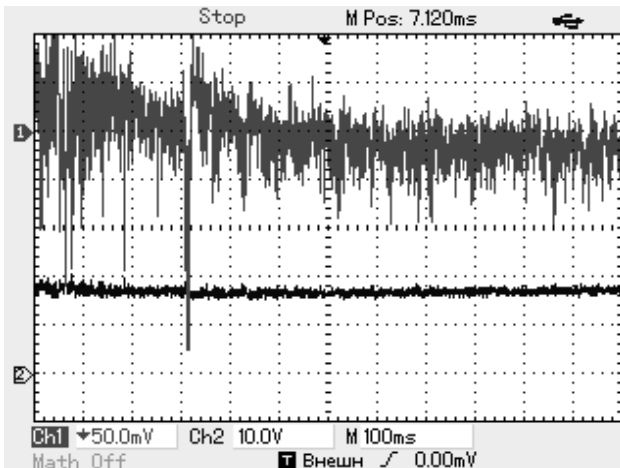


Рис. 3.39. Пульсации тока устойчивой дуги между стальными электродами в схеме с резистивной нагрузкой при среднем токе 3 А ( $U_n=50$  В, зазор 0,2 мм).

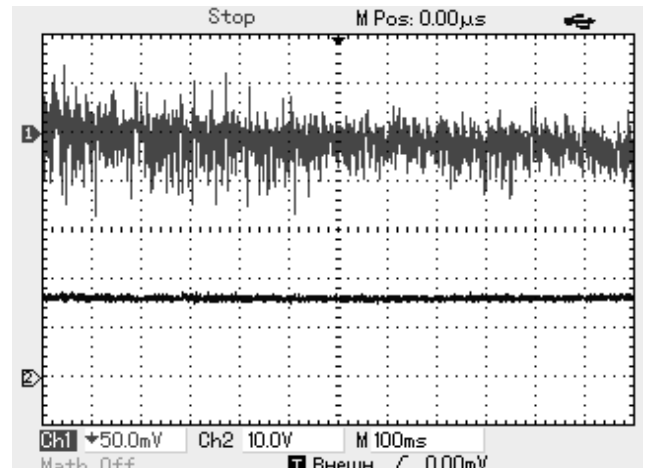


Рис. 3.40. Пульсации тока устойчивой дуги между стальными электродами в схеме с резистивной нагрузкой при среднем токе 4,5 А ( $U_n=50$  В, зазор 0,2 мм).

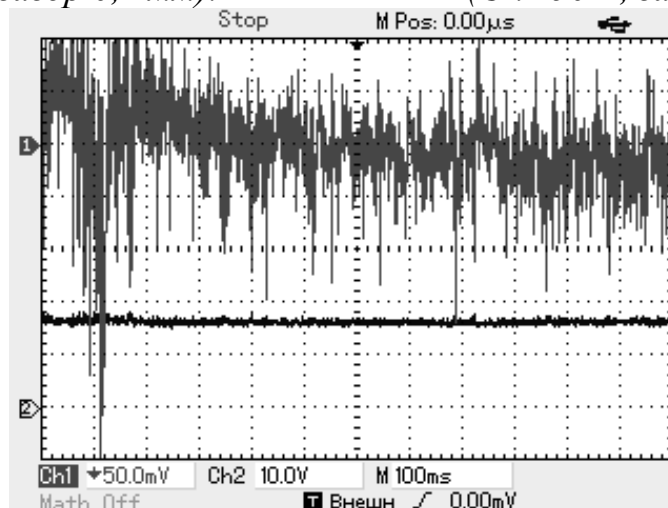
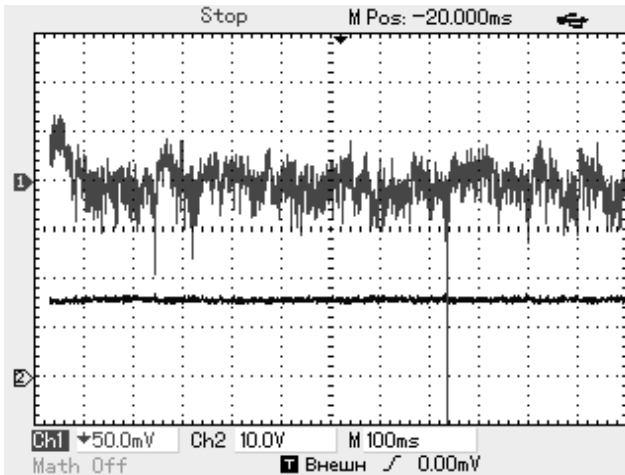
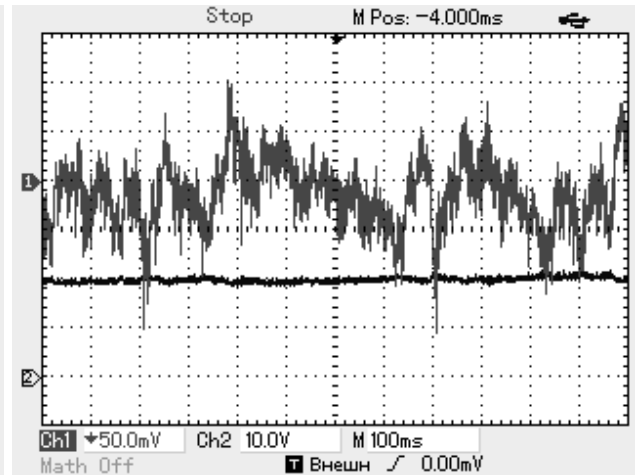


Рис. 3.41. Пульсации тока устойчивой дуги между стальными электродами в схеме с резистивной нагрузкой при среднем токе 6 А ( $U_n=50$  В, зазор 0,2 мм).

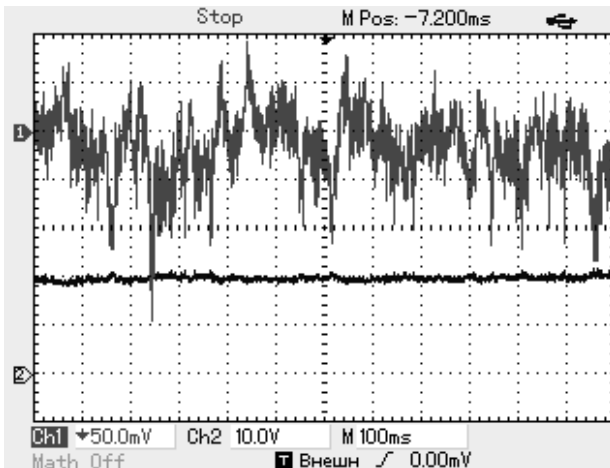
4. Размах пульсаций тока и напряжения дуги зависит от материала электродов (рис. 3.42...3.45). Установлено, что при одинаковых внешних условиях размахи пульсаций тока при разных материалах соотносятся между собой как напряжения на их вольтамперных характеристиках. Максимальные пульсации соответствуют алюминиевым и медным электродам, минимальные – латунным и стальным.



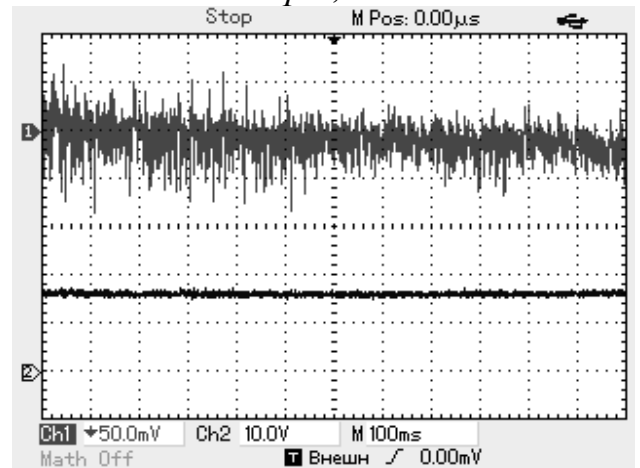
*Рис. 3.42. Пульсации тока устойчивой дуги между латунными электродами в цепи с резистивной нагрузкой.  $U_n=50$  В, зазор 0,2 мм.*



*Рис. 3.43. Пульсации тока устойчивой дуги между алюминиевыми электродами в цепи с резистивной нагрузкой.  $U_n=50$  В, зазор 0,2 мм*



*Рис. 3.44. Пульсации тока устойчивой дуги между медными электродами в цепи с резистивной нагрузкой.  $U_n=50$  В, зазор 0,2 мм.*



*Рис. 3.45. Пульсации тока устойчивой дуги между стальными электродами в цепи с резистивной нагрузкой.  $U_n=50$  В, зазор 0,2 мм.*

5. Размах пульсаций возрастает с увеличением зазора, поскольку при этом увеличиваются длина плазменного столба и мощность дуги.

### **Выводы по главе 3.**

1. Исследованы процессы возникновения и развития последовательной дуги между расходящимися контактами. 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.

2. Установлено, что вероятность возникновения дуги между расходящимися контактами максимальна в цепях с нагрузками индуктивного характера и минимальна в цепях с нагрузками емкостного характера, а также с коллекторными электродвигателями постоянного тока.

3. Разработаны портативные стенды для исследования прерывистой хаотической и регулярной последовательной дуги. Показано, что характер изменения тока в дуге зависит от материала контактов, напряжения сети и величины зазора, но общим свойством является пульсация тока между исходным значением и некоторым промежуточным уровнем, соответствующим фазе горения дуги, что может послужить критерием её индикации.

4. Исследованы статические 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. 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, контролирующих изменения токов в фидерах нагрузок.

5. Исследованы пульсации тока устойчивой дуги. 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 пульсаций тока зависит от материала контактов и коррелируется с параметрами статических ВАХ. Показано, что 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).

б. 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.

## ГЛАВА 4

### **Индикация дуги последовательного типа по её характерным свойствам.**

В главе приводятся результаты исследований и разработки методов индикации последовательной дуги, основанных на обнаружении её характерных признаков в текущих процессах тока нагрузки.

Основным достоинством таких методов при условии их достоверности является универсальность по отношению к роду тока, уровню напряжения сети и типу нагрузок. Недостатки методов – ложные отключения нагрузок при наличии в системе процессов, схожих с дугой: неаварийных дуговых разрядов, работе коллекторных электродвигателей, неустойчивой работе ИВЭ РЭА, а также в условиях электромагнитных наводок из цепей, содержащих дугу.

Характерные признаки дуги перечислены в главе 1:

- наличие интенсивного широкополосного шума;
- хаотические и одновременные изменения параметров шума;
- рекурсивность;
- сплошной непрерывный спектр шума.

Оценим эффективность методов, базирующихся на обнаружении перечисленных и некоторых других признаков дуги в условиях низковольтных авиационных СЭС.

#### ***4.1 Свойства низковольтных авиационных электросетей и потребителей их энергии.***

При выборе метода индикации дуги приходится учитывать свойства сети конкретного объекта и свойства электрических нагрузок системы. Ниже перечислены типовые нагрузки традиционных низковольтных авиационных систем электроснабжения:

- нерегулируемые резистивные нагрузки систем освещения и обогрева с нелинейными сопротивлениями;

- нерегулируемые индуктивно-резистивные нагрузки (электромагнитные механизмы и мощные контакторы);
- нерегулируемые электродвигательные механизмы с коллекторными электродвигателями постоянного тока;
- радиоэлектронная аппаратура с внутренними источниками вторичного электропитания различных поколений, содержащими LC фильтры с различной удельной реактивной мощностью;
- нерегулируемые вентиляторы с приводом от бесколлекторных электродвигателей постоянного тока (БДПТ);
- импульсно-периодические нагрузки с частотами повторения импульсов 0,5...400 Гц;

С появлением на борту транзисторной коммутационно-защитной аппаратуры и полупроводниковых центров управления нагрузками возникает возможность возложить на транзисторные АЗК дополнительные функции несложного широтно-импульсного управления некоторыми нагрузками:

- обогревателями кабин и стёкол на частотах 15...30 Гц;
- устройствами освещения с лампами накаливания и светодиодами на частотах 80...120 Гц;
- регуляторами насосов и вентиляторами на частотах 30...200 Гц.

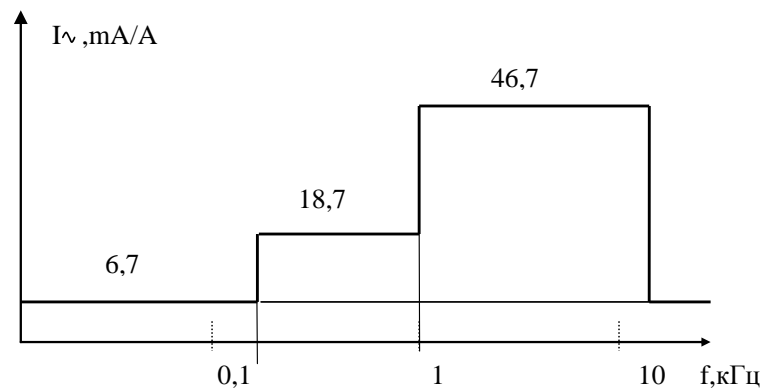
Кроме свойств нагрузок необходимо учитывать влияние сетевых помех [46]:

- увеличения и уменьшения сетевых напряжений в переходных режимах СЭС (продолжительностью до 0,1 секунды в нормальных и до одной секунды в ненормальных режимах);
- пульсаций напряжения сети в диапазоне частот 0,01...15 кГц с максимальной амплитудой до 2 В;
- импульсных напряжений с максимальной амплитудой до  $\pm 600$  В, продолжительностью до 10 мкс и высокочастотным наполнением;



- неаварийных дуговых разрядов, возникающих при работе контактной аппаратуры, продолжительностью в десятки миллисекунд;
- «перекрёстных» помех из соседних проводов общего жгута;
- импульсов напряжений, наводимых молниями;
- обесточивания исправных фидеров на время ликвидации аварий в магистральных цепях со временем перерыва в питании до 7 секунд;
- воздействия напряжениями звукового диапазона в цепи электропитания в ходе проверок оборудования на устойчивость к кондуктивным помехам.

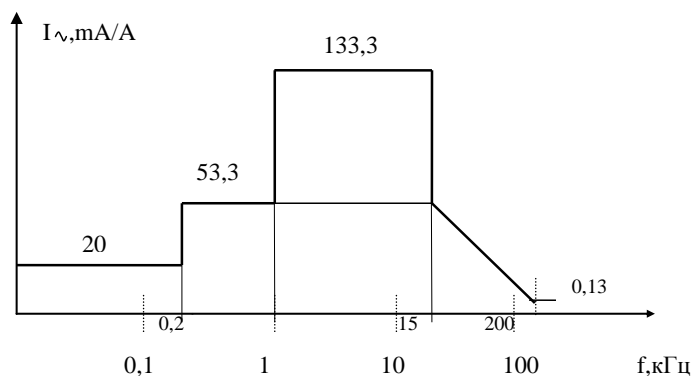
Рассмотрим вначале нормированные помехи.



*Рис. 4.1. Допустимый уровень помех в системах постоянного тока напряжением 27 В.*

На рис. 4.1 приведена зависимость допустимого уровня помех (действующие значения) от частоты помех в системах электропитания постоянным током при номинальном напряжении 27 В (ГОСТР 54073-2010), пересчитанная к одному амперу номинального тока нагрузки. Уровень помех определяют в основном два фактора: пульсации на выходе трансформаторно-выпрямительных блоков и наличие высших гармоник в первичном напряжении переменного тока. Выпрямление переменного напряжения с частотой 400 Гц традиционно осуществляется двумя трёхфазными мостами от обмоток трёхфазного трансформатора со сдвигом в 30 электрических градусов и поэтому частота пульсаций выпрямленного напряжения

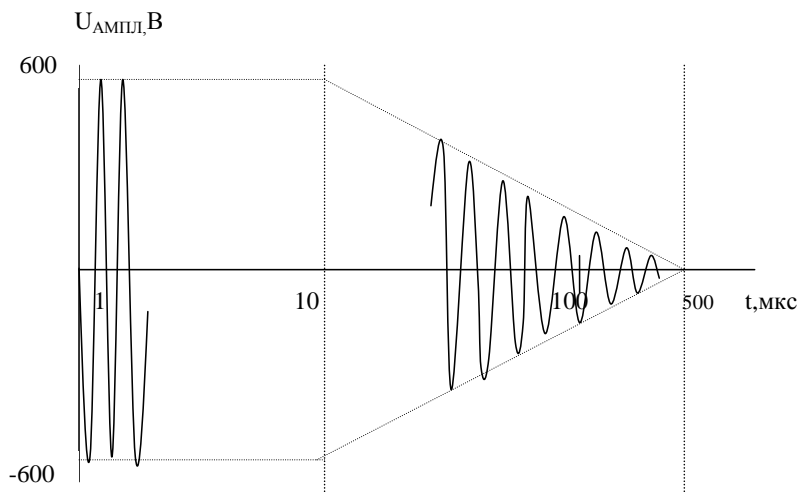
оказывается в 12 раз выше основной частоты, которая в свою очередь может быть стабилизированной, либо переменной (360...800 Гц). Может иметь место также модуляция основной частоты низкой частотой до 4 Гц из-за крутильных колебаний приводных валов генераторов. Наличие в спектре напряжения сети помех в области частот ниже 400 Гц можно объяснить влиянием других устройств с циклическим режимом работы, в частности импульсно-периодических нагрузок. В диапазоне частот 1...15 кГц уровень помех, приведённый к амперу тока, соизмерим с уровнем пульсаций тока дуги и поэтому может существенно осложнить её индикацию. Напротив, в диапазоне частот 10...200 Гц уровень помех в 4...10 раз меньше типовых пульсаций в токе дуги, что казалось бы, даёт возможность исключить их влияние низкочастотными фильтрами и пороговыми устройствами. Однако здесь дополнительно следует принять во внимание нормативы на уровень помех, искусственно создаваемых при испытаниях устройств на электромагнитную совместимость. На рис.4.2 приведена диаграмма частотного распределения испытательного уровня помех звукового диапазона по данным КТ-160В [47]. В диапазоне частот 10...200 Гц уровень помехи оказывается соизмеримым с пульсациями тока дуги. Попытка использовать диапазон выше 15 кГц также оказывается несостоятельной, поскольку наряду со значительным уменьшением помехи ослабляются и пульсации тока дуги. Так, например, на частоте 100 кГц уровни помехи и пульсаций дуги составляют соответственно 0,33 мА/А и 0,15 мА/А.



*Рис. 4.2. Испытательный уровень помех в системах постоянного тока напряжением 27 В.*

Рассмотрим теперь нормированные помехи, возникающие при отключении индуктивных нагрузок контактными устройствами.

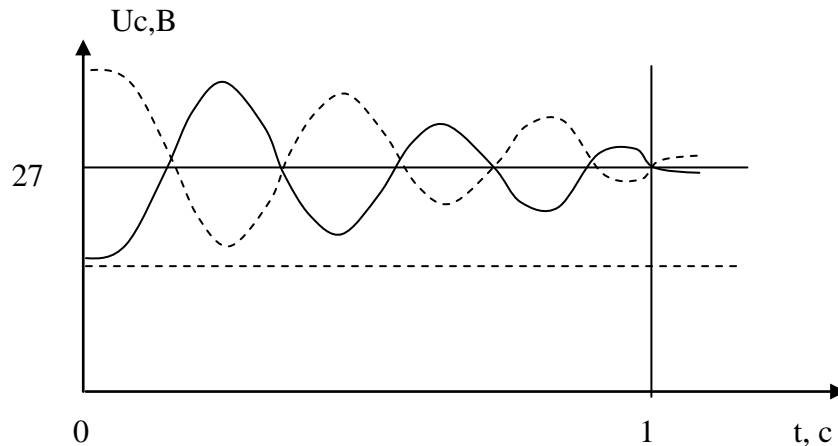
На рис.4.3 приведен график огибающей высокочастотного напряжения импульсной помехи. Процесс начинается с отрицательной полуволны напряжения в соответствии со знаком ЭДС самоиндукции, возникающей на контактах отключаемой индуктивной нагрузки. При контактном отключении между контактами возникает дуга, а процесс приобретает колебательный характер. Несмотря на ограничение по внутреннему сопротивлению источника перенапряжения (50 Ом), сила тока в начальной фазе процесса может составить 12 А, а сам процесс представляет угрозу безопасности электронных устройств. Между тем существует возможность его полной ликвидации с помощью диода, включённого катодом к распределительной шине. Исследования, проведённые авторами совместно со специалистами авиационной промышленности в 1980...1987 годах на стендах авиационных СЭС подтвердили действенность этого способа.



*Рис. 4.3. График импульсной помехи в авиационных СЭС.*

Отклонения питающего напряжения в переходных режимах СЭС нормируются ГОСТ Р 54073-2010. Переходные режимы цепей электропитания чаще всего возникают при резких изменениях нагрузки системы. Сплошная кривая на рис. 4.4 иллюстрирует переходную форму кривой напряжения в сети 27 В при включении мощной нагрузки. За относительно резким спадом напряжения в миллисекундном диапазоне

следует колебательный процесс, заканчивающийся по нормам ГОСТ за 0,1 с в нормальных режимах и за 1 с – в ненормальных. Кривая пунктиром соответствует процессу отключения мощной нагрузки. Максимальные напряжения при отключении нагрузок могут достигать 80 В, минимальные напряжения при включении нагрузок могут составлять 10...12 В.



*Рис. 4.4. Переходные отклонения напряжения в сети 27 В при коммутации мощной нагрузки.*

При испытаниях аппаратуры, предназначенной для установки на авиационный борт, реальные переходные напряжения сети, приведённые на рис. 4.4, заменяются испытательными циклами в соответствии с руководством КТ-160. Циклы состоят из ряда последовательных воздействий импульсами напряжения сети прямоугольной формы с вариацией их амплитуды и продолжительности. Амплитуда и продолжительность импульсов синтезируется из реальных кривых. Метод синтеза был изложен в «Приложении» к одной из ранних версий стандарта на качество электропитания в авиационных системах.

Поскольку реальные и испытательные напряжения неподобны, приходится проектировать любую новую аппаратуру, предназначенную для установки в традиционные системы, с учётом обоих видов воздействия сетевыми переходными напряжениями. Таблица 4.1 обобщает свойства нагрузок и сети, затрудняющие индикацию аварийных дуговых разрядов.

Таблица 4.1

Признаки аварийной дуги	Источники помех								
	Авар. дуга	Неавар. дуги	КДПТ	Пульсации сети	Импульс. помех	Перех. проц.	ИВЭ	ИПН	ШИМ
Изменение среднего тока	+	+	+	–	–	–	+	–	–
Резкий спад тока	+	+	+	–	+	+	+	+	+
Наличие шума в токе	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Широкий спектр шума	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Рекурсивность	+	+	+	–	–	–	–	–	–
Хаотичность размаха пульсаций тока	+	+	+	–	–	–	–	–	–
Хаотичность интервалов пульсаций тока	+	+	+	–	–	–	–	–	–
Продолжительное действие	+	–	+	+	–	–	+	+	+

*Свойства нагрузок и сети, затрудняющие индикацию аварийных дуговых разрядов.*

Анализ данных таблицы позволяет наметить способы ликвидации ложных срабатываний защиты при кратковременных помехах:

- введение задержек срабатывания защиты, начиная от момента включения АЗК на время, достаточное для завершения пусковых процессов в нагрузках;
- введение задержек срабатывания защиты, либо блокировок по уровням в переходных режимах СЭС;
- выбор интервала индикации дуги более продолжительным, нежели время коротких неаварийных дуговых процессов;
- использование циклических алгоритмов индикации.

Приняв во внимание наличие перечисленных средств борьбы с кратковременными сетевыми помехами, оценим применимость основных методов индикации последовательной дуги в авиационных условиях.

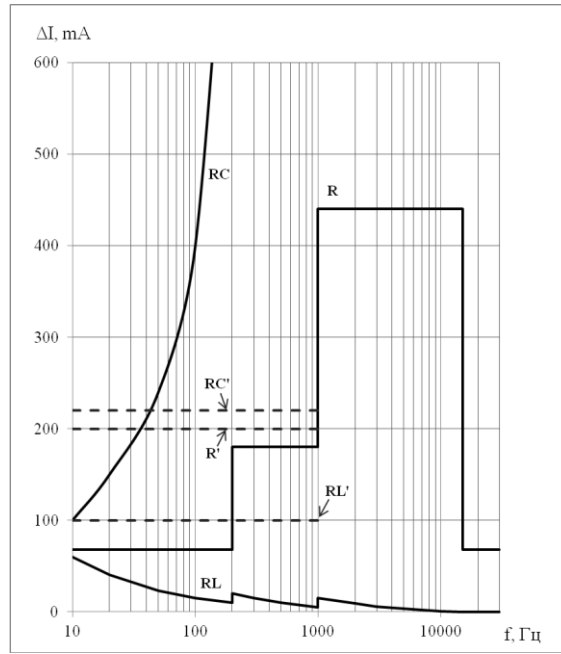
## ***4.2. Характерные признаки последовательной дуги. Методы её индикации по этим признакам.***

### ***4.2.1 Уровень шума дуги.***

Сигналом на вход устройства защиты, как правило, являются пульсации тока в фидере нагрузки, выделенные из общего тока с помощью трансформаторов, либо резистивных датчиков тока и RC цепочек, что предпочтительнее в составе АЗК, где резистивный датчик тока уже имеется. Заметим также, что современная вычислительная техника позволяет достаточно достоверно измерить размах пульсаций на фоне постоянной составляющей тока без применения дифференцирующих цепей и избежать паразитных искажений сигнала во время переходных процессов.

На рис. 4.5 приведены зависимости размаха пульсаций тока в фидерах с R, RL и RC нагрузками от их частоты в диапазоне 0,01...15 кГц, рассчитанные с учётом нормативов на пульсации сетевого напряжения по ГОСТ Р 54073-2010 для авиационных СЭС постоянного тока напряжением 27 В. В расчётах приняты следующие константы: ток нагрузки – 3 А, активные сопротивления нагрузок – 9 Ом, постоянные времени реактивных нагрузок – 8 мс (по авиационным нормам), индуктивность RL нагрузки – 72 мГн, ёмкость RC нагрузки – 900 мкФ. Пульсации тока в резистивных нагрузках копируют пульсации напряжения сети, пульсации тока в RL нагрузках убывают, а в RC нагрузках – возрастают с ростом частоты. На рисунке 4.5 пунктиром нанесены уровни максимального размаха пульсаций тока реальных дуговых разрядов в цепях с упомянутыми выше нагрузками. Дуга создавалась постепенным увеличением зазора между медными контактами до максимальной величины в 1 мм. Максимальный размах пульсаций выделялся из общей картины дуги на каждом из десяти интервалов процесса продолжительностью в 0,1 с, затем результаты усреднялись на общем интервале индикации в 1 секунду. Сравнение размахов пульсаций дуги с размахом сетевых пульсаций свидетельствует о безусловной применимости данного метода индикации в цепях с

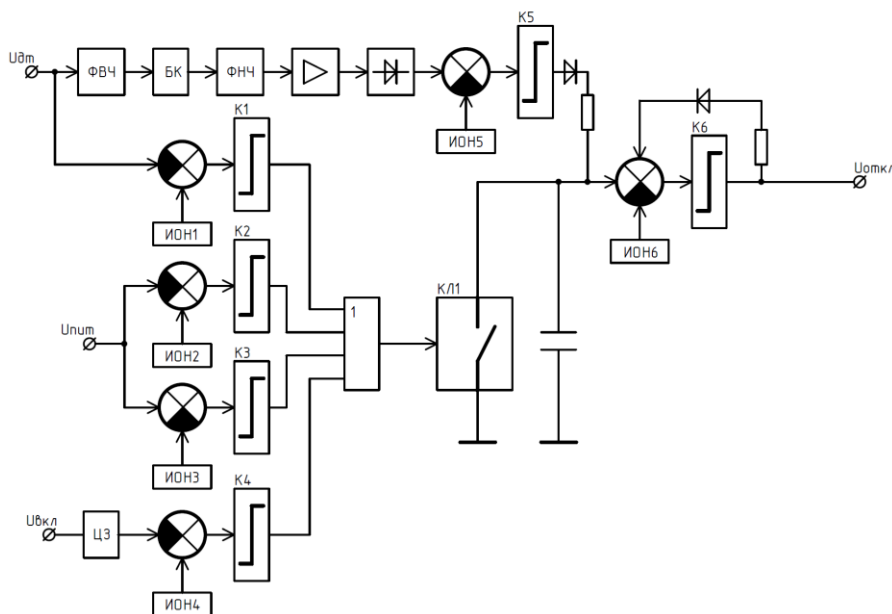
нерегулируемыми  $RL$  и  $R$  нагрузками с условием выделения ограниченных контрольных диапазонов частоты: для  $RL$  нагрузок –  $0...1000$  Гц, для  $R$  нагрузок –  $0...100$  Гц. Для цепей с  $RC$  нагрузками (ИБЭ РЭА) метод неприменим, если на входе ИБЭ по рекомендации их разработчиков приходится устанавливать конденсаторы большой ёмкости.



*Рис. 4.5. Зависимости размаха пульсаций тока в фидерах с  $R, RL$  и  $RC$  нагрузками от их частоты в диапазоне  $0,01...15$  кГц для авиационных СЭС постоянного тока напряжением  $27$  В.*

На рис. 4.6 приведена функциональная схема индикации дуги в  $RL$  и  $R$  нагрузках по уровню шума. В составе тракта прямой передачи сигнала: фильтр высокой частоты ФВЧ, выделяющий переменную составляющую тока дуги, буферный каскад БК, фильтр нижних частот ФНЧ с полосой пропускания  $0...200$  Гц, уменьшающий сетевые помехи, усилитель, детектор, компаратор  $K5$  с источником опорного напряжения ИОН5 на уровне сетевых помех и интегратор с блокирующим ключом  $Kл$  и цепью обратной связи, вносящей блокировку выходной команды на отключение АЗК. В составе вспомогательных узлов: компаратор нулевого тока  $K1$ , блокирующий работу интегратора в режиме нормально отключённой нагрузки, компараторы  $K2$  и  $K3$ , отслеживающие переходные режимы увеличения и уменьшения напряжений сети и блокирующие интегратор на время этих переходных

процессов, цепь задержки ЦЗ и компаратор К4, блокирующие интегратор в пусковых режимах нагрузки.



*Рис.4.6. функциональная схема индикации дуги в  $RL$  и  $R$  нагрузках по уровню шума.*

На рис. 4.7 приведена компьютерная модель схемы в пакете PSpice системы OrCAD (здесь и далее). Основной тракт схемы содержит следующие узлы:

- дифференцирующая цепь  $C2$ ,  $R12$ , выделяющая переменную составляющую шума из сигнала, снимаемого с датчика тока  $R11$ , установленного в силовой цепи АЗК;
- буферный повторитель на  $U1$ ;
- НЧ фильтр на  $R13$ ,  $R14$ ,  $C3$ ,  $C4$ ;
- буферный повторитель на  $U2$ ;
- усилитель на  $U3$ ;
- двухполупериодный детектор на  $U6$ ;
- формирователь прямоугольных импульсов на  $U8$  с опорным напряжением  $V16$ , рассчитанным по максимальной амплитуде сетевых помех;
- интегратор на  $R35$ ,  $C10$ ;
- компаратор на  $U9$  с цепью блокировки  $R41$ ,  $D11$ .



Силовые цепи моделируются следующими узлами:

- МДП транзистором M1 в качестве силового ключа АЗК с управляющим источником напряжения V1, цепью отключения на Q1, цепью ограничения тока на Q2 и цепью ограничения напряжения на D2, V18;
- резистивная, RL и ламповая нагрузки в виде R1, L1, R3, R5, R6, C1;
- имитатор напряжения сети в установившихся и переходных режимах на источниках напряжения V3...V5, V7...V11 с ключами S1...S5;
- цепь передачи сигнала о напряжении сети в схему индикации дуги на «зеркала тока» Q3, Q4 и Q5, Q6;
- имитатор сетевой помехи на V2;
- имитатор шума дуги на V6.

В процессе функционирования схемы возможно возникновение следующих непериодических помех, способных вызвать ложное срабатывание:

- включение напряжений  $\pm 15$  В, питающих схему;
- включение нагрузки;
- резкое увеличение и сброс сетевого напряжения.

Наиболее интенсивные непериодические помехи возникают в процессе резких изменений сигнала с датчика тока при коммутациях нагрузки и скачках напряжения сети, что вызывает переходные изменения напряжения на входе, продолжительность которых определяется постоянной времени дифференцирующего звена C2, R12. Для исключения влияния этих помех в схеме предусмотрена кратковременная блокировка интегратора с помощью ключа на Q7, который управляется с выходов двух одновибраторов. Один из них (на U7) запускается компараторами повышенного и пониженного напряжений сети (микросхемы U4, U5). Другой одновибратор (на U10) запускается, напряжением питания схемы АЗК (+15 В), либо сигналом включения АЗК.

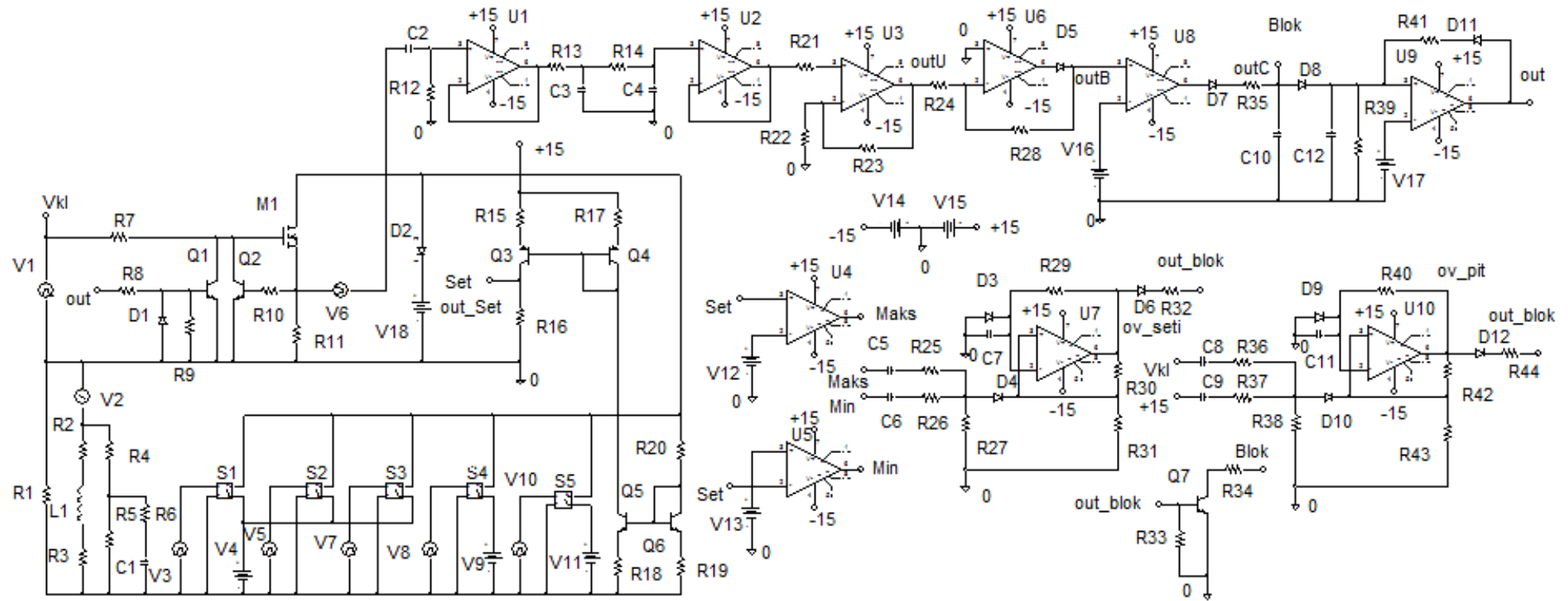


Рис. 4.7. Компьютерная модель индикатора дуги по её шуму.

На рис. 4.8 приведены временные диаграммы процессов, иллюстрирующих работу схемы. В интервале времени 0...1,1 с происходит включение питания схемы АЗК, включение силового транзистора, всплеск сетевого напряжения до уровня 60 В, сохранение этого уровня в течение 100 мс, пауза между всплеском и сбросом, сброс напряжения до уровня 18 В, сохранение этого уровня на время в 50 мс и затем восстановление номинального напряжения 27 В. Начиная с точки 1,1 с вводится действие имитатора шума дуги с амплитудой 10 мВ, приведённой к датчику тока в 0,1 Ом. Сетевая помеха присутствует постоянно от начала включения нагрузки.

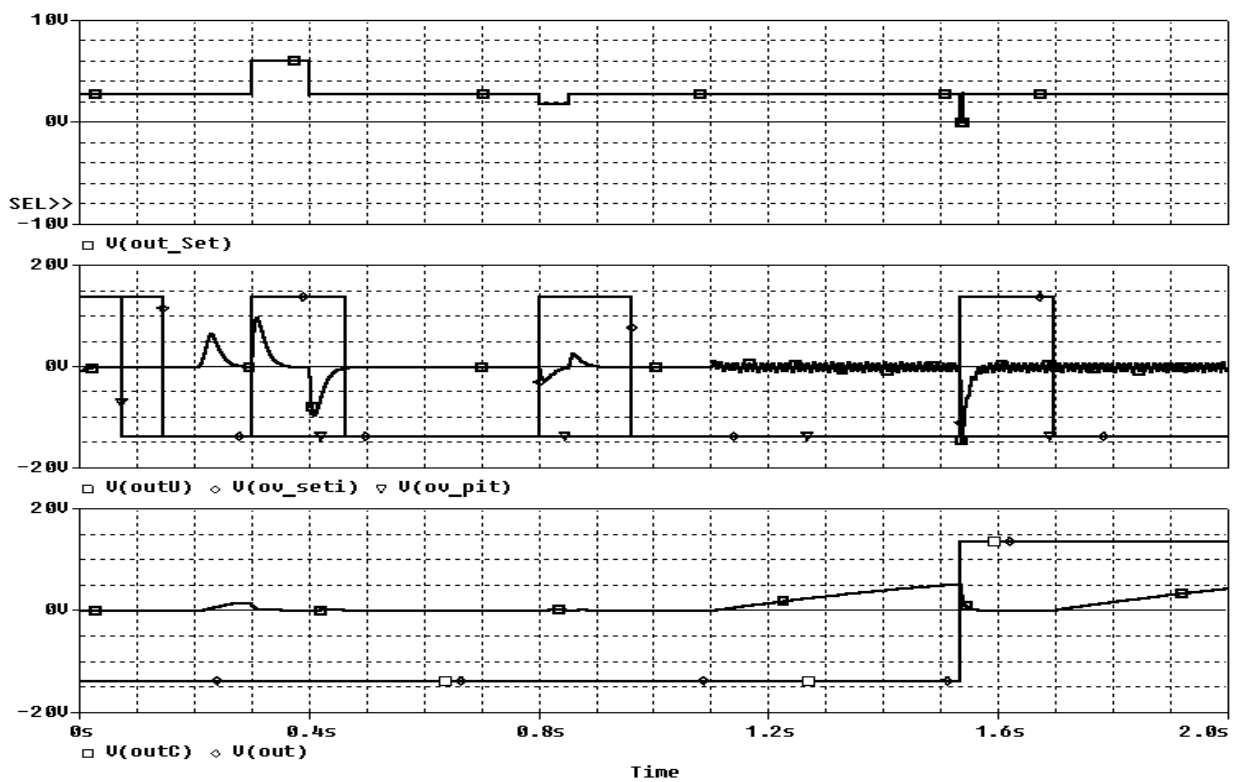


Рис. 4.8. Временные диаграммы процессов в схеме на рис. 4.7.

На верхней диаграмме – напряжение сети, пересчитанное через два «зеркала тока» в точку «Set». Ниже – импульсные помехи, усиленные каскадом на U3 (точка «out\_U») и напряжения на выходе одновибратора сети «ov\_set1» и одновибратора цепей питания «ov\_pit». На нижней диаграмме – напряжение на конденсаторе интегратора «out\_C» и напряжение на выходе всей схемы («out»).

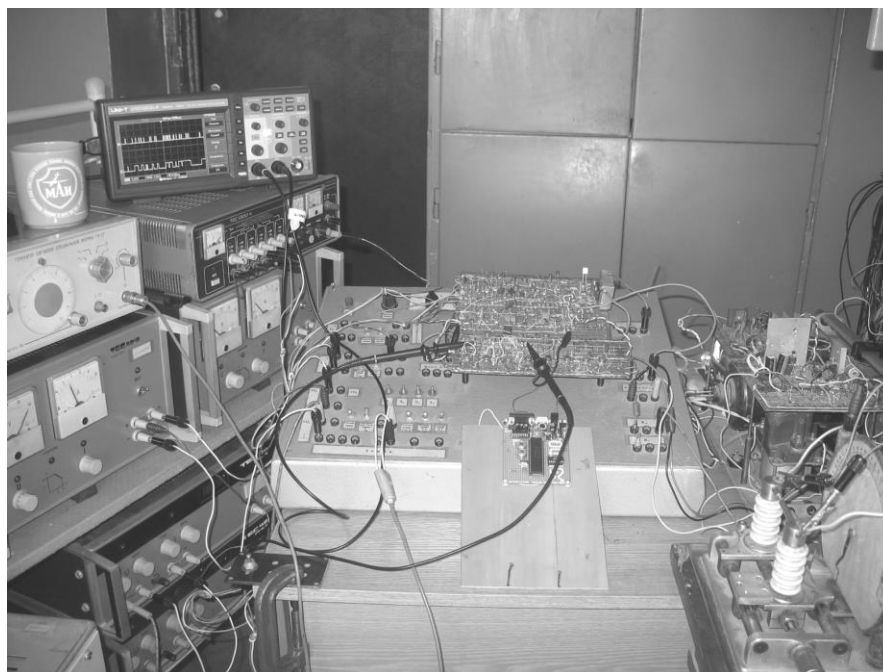
Схема может быть упрощена за счёт исключения одновибраторов, компараторов, контролирующих напряжение сети и блокирующего транзистора Q7, если увеличить ёмкость конденсатора в интеграторе до 5...10 мкФ. Моделирование такого варианта показывает, что задержка срабатывания схемы на дугу не превышает одной секунды.

Испытания макета схемы проводились на лабораторном стенде, разработанном ранее для исследований транзисторных АЗК (рис. 4.9). Стенд позволяет создавать следующие режимы:

- однократные и периодические короткие замыкания нагрузки АЗК;
- переходные режимы повышения и понижения напряжения сети в циклическом режиме (в частном случае по нормам КТ-160);
- режим воздействия коммутационными помехами по входу АЗК;
- режим гармонической сетевой помехи по цепи питания.

В комплекте со стендом используются следующие приборы:

- набор лабораторных источников постоянного напряжения (серия ТЕС);
- генератор периодических сигналов типа Г6-27;
- генератор синусоидального напряжения Г3-33.



*Рис. 4.9. Фотография рабочего места.*

В ходе испытаний были получены результаты, подтверждающие итоги компьютерного моделирования. Наряду с положительными результатами испытаний схемы с индуктивными и ламповыми нагрузками подтвердились ограничения на применимость метода индикации дуги по уровню её шума при работе АЗК на емкостные нагрузки. Для решения вопроса о применимости рассмотренной схемы в цепях с ИВЭ РЭА необходимо иметь сведения о составе и параметрах фильтра во входной цепи ИВЭ.

Далее можно зафиксировать следующее:

- метод неприемлем для цепей с КДПТ ввиду наличия значительных по амплитуде пульсаций якорного тока машины;
- необходимость применения полосовых реактивных фильтров для выделения рациональных частотных диапазонов затрудняет индикацию дуги в цепях с ИПН и ШИМ нагрузками из-за возникновения переходных пульсаций токов;
- эффективность метода снижается тем, что размах пульсаций тока дуги и напряжения на дуге зависит от многих факторов: величины зазора, материала, состояния и условий охлаждения электродов, а также от среднего значения тока нагрузки; при этом экспериментально установлено отсутствие прямой пропорциональности между средним значением тока в RL и R нагрузках и размахом пульсаций тока и напряжения (см. главу 3).

*4.2.2. Прямое измерение размаха пульсаций тока дуги цифровым методом.*

Измерение размаха пульсаций дуги в десятки милливольт на фоне постоянной составляющей напряжения в сотни милливольт в сигнале с датчика тока можно произвести цифровыми средствами напрямую, т.е. не разделяя постоянную и переменную составляющие. Это позволяет избежать возникновения импульсных помех при резких изменениях сигнала. Предлагаемый способ заключается в циклическом измерении максимальных и минимальных напряжений сигнала, вычислении их разницы, сравнении

полученных результатов с заданной величиной размаха пульсаций в неаварийном сигнале. Многократно повторившийся факт превышения размаха пульсаций реального сигнала над эталонным на достаточно продолжительном интервале измерения (например, 1 секунда) расценивается как возникновение дуги.

Испытания цифровой схемы на лабораторном стенде дали положительные результаты при управлении индуктивными и ламповыми нагрузками. При управлении ИВЭ РЭА наблюдались устойчивые ложные срабатывания в отсутствие дуги из-за наличия в сигнале циклических коммутационных высокочастотных помех от ИВЭ, возникающих на фронтах переключения силовых транзисторов и проникающих на вход АЦП сквозь двухзвенный низкочастотный НЧ фильтр макета, выполненный на дискретных навесных элементах. Кроме того, ограничения по токам от сетевых пульсаций, описанные в предыдущем разделе, сохраняются и здесь.

Отсутствие достоверных сведений о характере процессов в цепях питания ИВЭ реальных устройств ЛА вынуждает исключить данный метод индикации дуги из числа пригодных для силовых цепей с ИВЭ РЭА.

#### *4.2.3 Наличие шума во всей полосе рабочих частот.*

В основе метода – несоответствие спектра дуги и спектров сетевых пульсаций, скорректированных свойствами нагрузок. Метод предполагает знание частотных свойств системы электроснабжения конкретного объекта и может быть реализован, например, с помощью нескольких узкополосных фильтров, настроенных на частоты предполагаемого «молчания» спектров СЭС. В заявке США № US 2004/0156153 (Honeywell Inc.) описано устройство обнаружения дуги в самолётных системах по признаку наличия шума на четырёх некратных частотах, выбранных в диапазоне 2...15 кГц (2 кГц, 3 кГц, 5 кГц и 7 кГц), который расположен выше максимально возможной частоты авиационных генераторов переменного тока (800 Гц). Одновременное присутствие шума на всех четырёх частотах при условии

отсутствия шума в общей питающей сети и в проводах заземлений означает (по мнению авторов) наличие аварийной дуги.

Наиболее полно, идея обнаружения дуги по её шуму отражена в публикации [15] и в патенте № EP 1695425 B1 ( Fachhochschule, Dortmund), полученном авторами публикации, где предлагается устройство сканирования частотного диапазона для сравнения полученного спектра со спектрами известных нагрузок и спектрами самолётной сети. Сканирование осуществляется с помощью аналоговых фильтров на переключаемых конденсаторах. Анализ результатов производится с помощью МП.

Отметим, что недостатком первого технического решения является отсутствие универсальности по отношению к контролируемым системам, а недостатком второго – низкая эффективность в цепях с непрерывными спектрами: ИВЭ РЭА релейного типа и КДПТ.

#### *4.2.4. Наличие пульсаций напряжения на дуге.*

Метод неприменим в схемах с силовыми контактными ключами, поскольку напряжение на выходе постоянно включённого прерывателя всегда равно напряжению сети, а для индикации напряжения на дуге требуется проложить сигнальный провод от входного зажима нагрузки.

Используя новые возможности транзисторных АЗК, можно при подозрениях на дугу задать контрольный постоянный ток в нагрузку и по факту наличия пульсаций на выходе АЗК подтвердить наличие дуги.

Достоинством метода является факт отсутствия в выходном сигнале сетевых пульсаций. К недостаткам можно отнести следующее: метод предполагает наличие какого-либо «первичного признака дуги», по наличию которого АЗК переводится в режим непрерывного ограничения тока и второе – уровень контрольного тока должен быть относительно небольшим по условию работы силового транзистора в линейном режиме (а при малом токе может погаснуть дуга). Метод неприменим в цепях с КДПТ.

#### 4.2.5. Резкое падение тока в начальной стадии дуги.

В описании к патенту US 6683766 от фирмы «Yazaki Nort America» утверждается, что такой способ в сочетании с быстрым разрывом цепи с помощью транзисторного ключа опережает зажигание голубой дуги. Следует, однако предположить, что способ будет иметь существенный недостаток в виде ложной реакции на импульсные помехи.

Факт резкого падения тока перед зажиганием дуги был изучен испытаниями схемы, приведённой на рис. 4.10. Дуга возникает между контактами электромагнитного реле К1, коммутирующими нагрузки различного характера. Реле управляется с выхода транзисторного усилителя по однократному сигналу импульсного генератора. Одновременно запускается развёртка ждущего осциллографа.

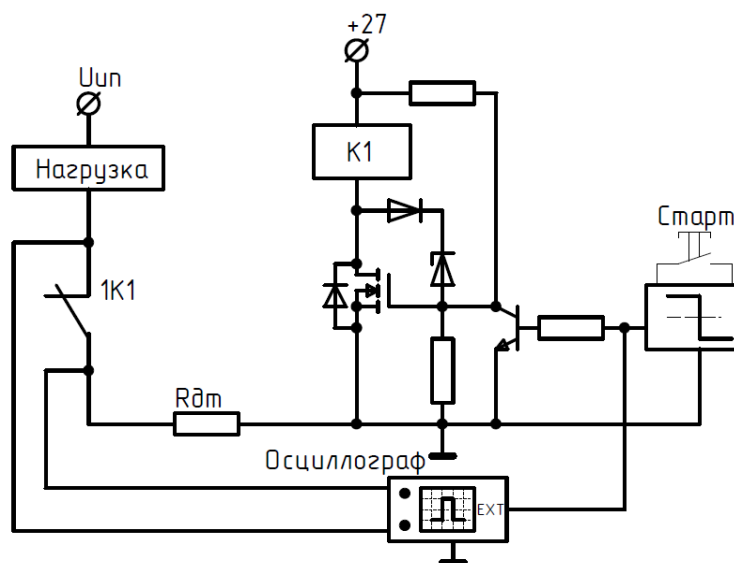


Рис. 4.10. Схема лабораторного макета для исследования характера спада тока перед возникновением голубой дуги.

Для увеличения продолжительности горения дуги был уменьшен зазор между контактами реле. На всех осциллограммах отмечен резкий спад тока перед зажиганием дуги; самый быстрый с цепи с ИВЭ (менее 100 мкс), самый медленный – в цепи с индуктивной нагрузкой (2 мс). Сокращение времени спада тока в цепях с ИВЭ и КДПТ по сравнению с остальными нагрузками объясняется не только высокой добротностью силовых контуров



у этих нагрузок, но и тем фактом, что уменьшающийся ток стремится не к нулю, а к некоторому отрицательному значению, которое зависит от ЭДС вращения КДПТ, либо от напряжения на конденсаторе входного фильтра ИВЭ.

На рис. 4.11 приведена компьютерная модель схемы, реализующей способ индикации дуги по резкому падению тока в её начале. Схема содержит дифференцирующую цепь C1, R1, усилитель U1 и одновибратор U2 с временем возврата около 5 мс, что обеспечивает деионизацию дуги на начальной стадии. Одновибратор вырабатывает сигнал на кратковременный разрыв цепи нагрузки. Если срабатывание схемы произошло из-за появления дуги, то после интервала в 5 мс тока в цепи нагрузки не возникнет, что послужит сигналом к окончательному отключению силового транзистора. В случае ложного срабатывания схемы проводимость цепи нагрузки восстановится. Схема была экспериментально проверена и в цепях с RL и ламповыми нагрузками не вызвала критических замечаний. Однако, как и предполагалось, в цепях с ИВЭ отмечались частые ложные отключения при плохой фильтрации входного тока ИВЭ. В цепях с КДПТ наблюдались хаотические ложные отключения, вызванные коллекторными пульсациями. В цепях с импульсно-периодическими нагрузками схема принципиально неприменима. Таким образом, данный способ не обладает универсальностью по отношению к нагрузкам.

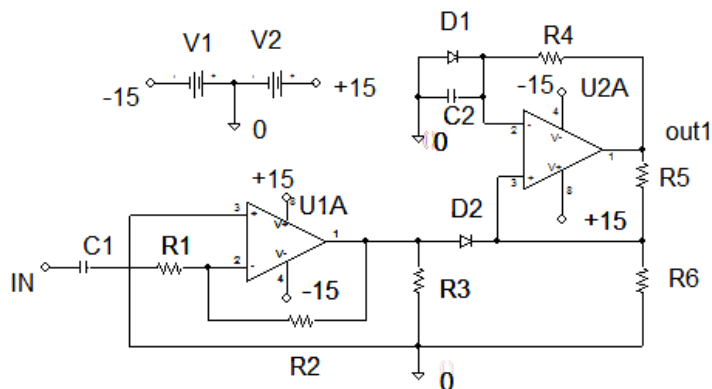


Рис. 4.11. Компьютерная модель схемы индикации дуги по спаду тока в её начале.

#### 4.2.6. Рекурсивность дуги.

Метод использует факт сохранения нерегулярности процессов после многократного повторения операций выделения контрольной частоты (начиная с низких частот), демодуляции и фильтрации. Достоинства метода в том, что он основан на фундаментальном свойстве дуги и не содержит количественных оценок. Один из недостатков состоит в том, что он даёт ошибку при любых нерегулярных процессах (неустойчивая работа ИВЭ, КДПТ, биения в ограниченном интервале времени). Другой недостаток – в относительно большом времени индикации. Третий недостаток – чувствительность цепей с фильтрами к импульсным помехам от ИПН и ШИМ нагрузок.

На рис. 4.12 приведена компьютерная модель аналоговой схемы, предназначенной для выявления факта рекурсивности дуги методом многократной демодуляции. Схема содержит два активных избирательных фильтра на U1 и U4. Первый из них настроен на частоту 100 Гц, второй – на частоту 25 Гц. Признаком рекурсивности дуги является наличие модуляции выходного напряжения  $V_{OUT}$ , которая сохранилась бы и при большем числе фильтров. Достоинством схемы является отсутствие необходимости в количественных оценках. Для проверки схемы на её вход подавалось синусоидальное напряжение частотой 100 Гц, модулированное по амплитуде напряжением более низкой частоты. При такой однократной модуляции выходное напряжение схемы равнялось нулю. При испытании лабораторного макета схемы с сигналом от дуги на выходе возникало переменное напряжение с хаотической модуляцией параметров. Однако, похожая картина наблюдалась и от пульсаций тока коллекторного электродвигателя в качестве входного сигнала, Кроме того, была выявлена чувствительность схемы к сигналам с резкими перепадами напряжения, которые вызывали паразитные возбуждения резонансных контуров. Для получения дискретного выходного сигнала, который мог бы использоваться в качестве команды на отключение аварийного фидера, схему необходимо дополнить индикатором хаоса в

пульсациях напряжения  $V_{OUT}$ . Изложенные результаты исследований исключают применение описанной схемы в качестве приоритетного средства идентификации дуги.

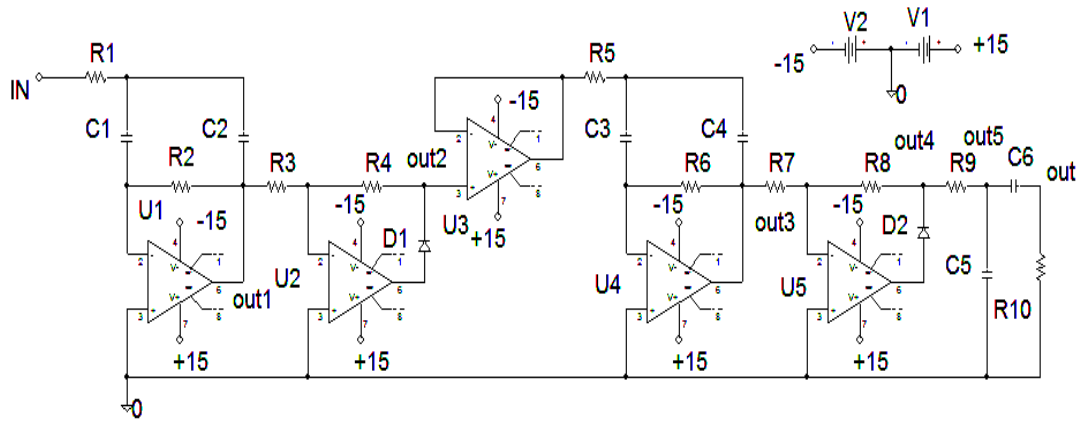


Рис. 4.12. Компьютерная модель аналоговой схемы индикации рекурсивности дуги.

#### 4.2.7. Наличие «фликкер-эффекта».

На рис. 4.13 приведена компьютерная модель аналоговой схемы выявления «фликкер-эффекта». Схема содержит два резонансных избирательных контура на U1 и U2, настроенных на частоты 25 Гц и 100 Гц внутри интервала частот 10...200 Гц, свободного от интенсивных сетевых помех. Выходные напряжения фильтров детектируются U3, U4 и сравниваются схемой деления на U7A, U8. При наличии дуги результат сравнения должен соответствовать соотношению  $U1/U2 = \sqrt{(f1/f2)}$ .

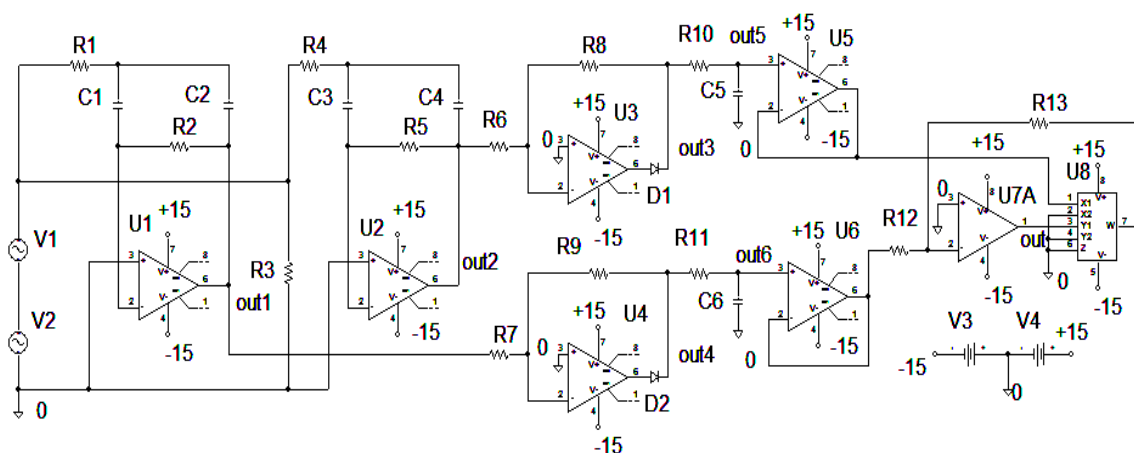


Рис. 4.13. Компьютерная модель аналоговой схемы индикации «фликкер-эффекта».

Для настройки схемы на её вход подавались два синусоидальных напряжения с частотами настройки фильтров и амплитудами, отличающимися в два раза. Выходные напряжения схемы в соответствии с ожиданиями также отличались вдвое. Схема была выполнена в виде лабораторного макета и подвергнута воздействию сигнала с датчика тока, содержащего шум от дуги в цепи с RL нагрузкой. Обнаружилось, что в выходном напряжении схемы, отражается негативное влияние амплитудной модуляции составляющих шума дуги на результаты измерений. Другой недостаток схемы – существенное изменение выходных параметров фильтров при вариации параметров резисторов и конденсаторов, необходимость применения прецизионных компонентов. Этот факт проверялся моделированием одного из фильтров в компьютерных программах системы OrCAD, работающих по методу «наихудшего случая» и методу Монте-Карло. При изменении параметров фильтра в пределах пяти процентов выходное напряжение фильтра изменялось практически в два раза. Полученные результаты ставят под сомнение возможность практического применения рассмотренного метода идентификации дуги (в его аналоговом исполнении).

#### *4.2.8. Непрерывность спектров дуги.*

Методы основаны на оценке «удельного веса» гармоник в токе дуги в сравнении с нормальными процессами и разработаны применительно к бытовым системам переменного тока со стандартным набором нагрузок (осветительные приборы, холодильники, бытовая электроника). Анализы базируются на разложении Фурье, либо вейвлет-преобразованиях. Поскольку спектры дуги нестабильны, методы оказываются достоверными лишь при больших различиях в количественных оценках нормальных и аварийных процессов. Большие различия в «весовых» оценках содержания гармоник имеют место при спокойных нагрузках, т.е. нагрузках, не создающих многочисленных гармоник при своём функционировании. В цепях постоянного тока это обмотки электромагнитных механизмов и

нерегулируемые осветительные и обогревательные приборы, а также ИВЭ РЭА с хорошо фильтрованными цепями питания. Импульсно-периодические нагрузки и нагрузки с ШИМ управлением имеют линейчатые спектры с меньшим содержанием гармоник, чем в дуге с её сплошным спектром. Однако, амплитуды этих гармоник существенно больше, чем амплитуды гармоник пульсаций дуги, что нивелирует различия в количественных оценках.

На рис. 4.14 приведён спектр пульсаций тока дуги в цепи с резистивной нагрузкой (средний ток – 3 А, напряжение питания цепи – 50 В, зазор между контактами – 0,2 мм, стальные электроды). Вплоть до максимальной частоты в окне (750 Гц) спектр имеет сплошной характер. Напряжение, пропорциональное току снимается с резистивного датчика в 0,1 Ом, фильтруется и усиливается в 10 раз, так что отсчёт амплитуд гармоник на экране осциллографа соответствует 20 мА/дел. Так, например, на частоте 62,5 Гц амплитуда тока составляет 30 мА.

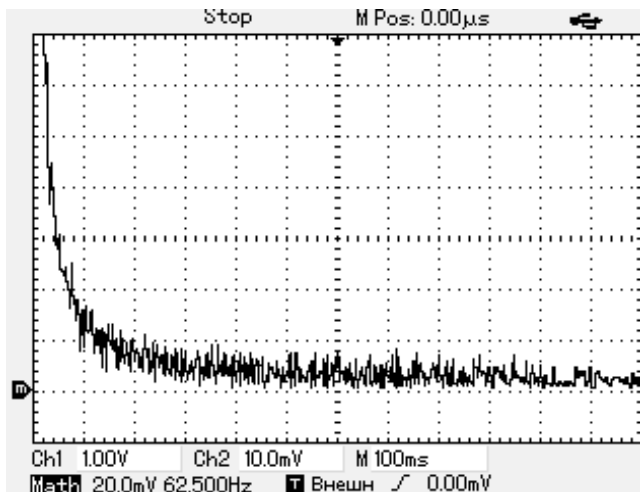


Рис. 4.14. Спектр тока дуги в цепи с резистивной нагрузкой.

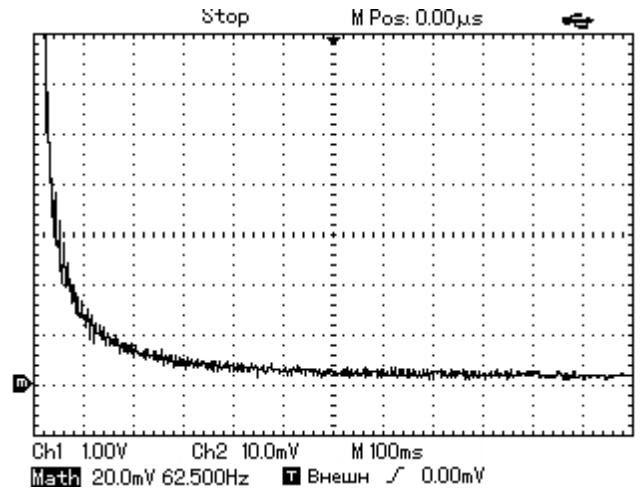


Рис. 4.15. Спектр тока дуги в цепи с RL- нагрузкой.

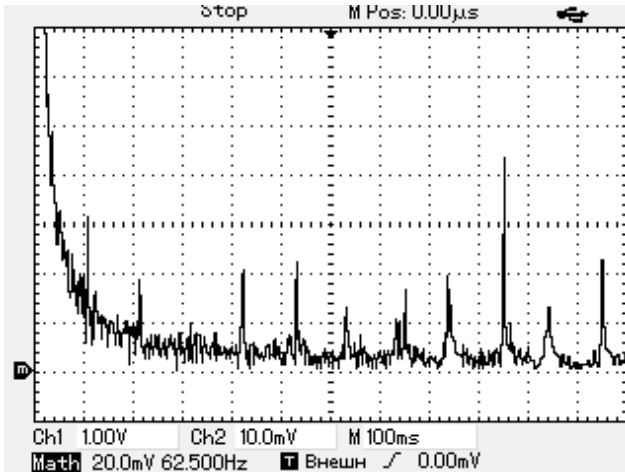


Рис. 4.16. Спектр тока дуги в цепи с КДПТ.

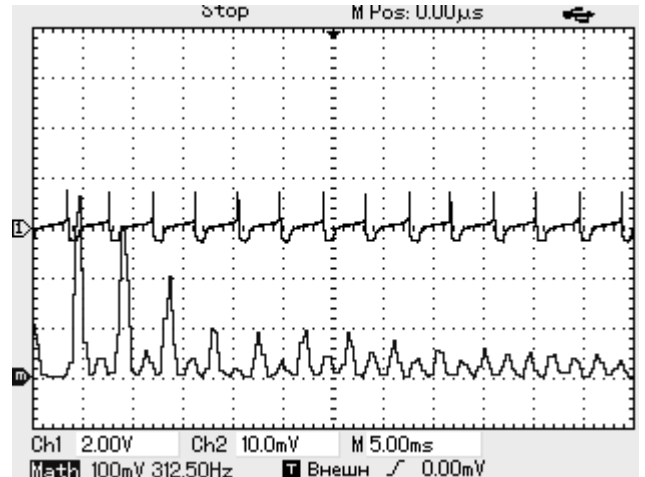


Рис. 4.17. Пульсации тока в цепи с вентилятором (вверху) и спектр тока в цепи с вентилятором.

На рис. 4.15 приведен спектр пульсаций тока дуги в цепи с RL нагрузкой, снятый при том же токе. Амплитуды гармоник в правой части спектра заметно уменьшились из-за фильтрующего действия нагрузки. На рис. 4.16 приведен спектр пульсаций в цепи с КДПТ без аварийной дуги. Спектр имеет непрерывный характер (что свидетельствует о наличии неаварийных дуговых процессов в коллекторном узле) и по количественным оценкам практически неотличим от спектра аварийной дуги. На рис. 4.17 приведены осциллограммы, соответствующие цепи с вентилятором на шаговом двигателе. Верхняя осциллограмма – ток потребляемый вентилятором, нижняя – спектр этого тока. Средний ток электродвигателя составляет 0,45 А при напряжении питания 24 В. Спектр имеет линейчатый характер, однако, сравнив амплитуду пульсаций на одной из контрольных частот (62,5 Гц, 360 мА), убеждаемся в том, что она существенно больше, чем в спектрах дуги. Метод предполагает знание весовых коэффициентов гармоник в штатных нагрузках и при смене нагрузок требует дополнительных проверок эффективности защиты.

#### 4.2.9. Индикация хаотичности в пульсациях тока дуги.

Методы основаны на обнаружении хаотичности изменения одного, или нескольких параметров шума дуги: среднего значения тока, размаха пульсаций тока, интервалов между импульсами, сформированными из

пульсаций тока и др. Наибольшая эффективность достигается в цепях с нерегулируемыми RL и R нагрузками при отсутствии аналоговых фильтров и индикации размаха пульсаций цифровыми методами. Индикация хаоса интервалов предполагает выделение пульсаций тока дифференцирующими цепями и последующее формирование прямоугольных импульсов. Такой метод может давать сбои в нескольких ситуациях:

- при наличии в сети нескольких помех, близких по частоте, что может вызвать низкочастотные биения и нерегулярность следования сформированных импульсов в пределах контрольного интервала;
- при нерегулярных процессах в нагрузках, таких как неустойчиво работающие ИВЭ или КДПТ;
- в цепях с ШИМ и ИПН нагрузками при слишком высокой точности измерений интервалов между импульсами, когда допустимые отклонения частоты и продолжительности импульсов могут быть приняты за хаос.

Хаотичность дуги можно напрямую оценить многократным сравнением (в пределах контрольного интервала) продолжительности положительных или отрицательных импульсов, сформированных компаратором из пульсаций тока дуги.

Исследования показали, что метод идентификации дуги по признаку хаотичности интервалов может быть достаточно эффективным в малоинерционных цепях с ИВЭ РЭА в качестве нагрузки, поскольку здесь в условиях относительно высокой частоты пульсаций тока дуги не требуется большого времени на достоверную её индикацию. На рис. 4.18 приведена компьютерная модель аналоговой части схемы индикации, содержащая НЧ фильтр на R1, R2, C1, C2, буферный каскад на U1, цепь выделения переменной составляющей пульсаций тока C3, R4, усилитель U2, выпрямитель U3 и компаратор U4, опорное напряжение которого V3 соответствует пересчитанному к данной точке схемы уровню сетевых

пульсаций тока. На рис. 4.19...4.22 приведены осциллограммы выходных напряжений схемы, соответствующие различным нагрузкам силовой цепи.

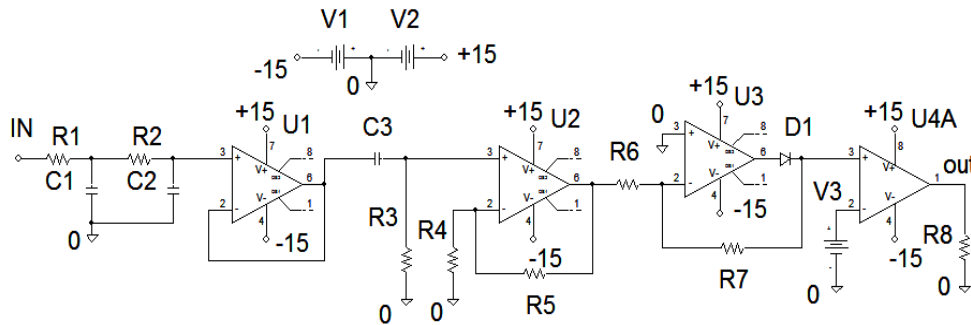


Рис. 4.18. Компьютерная модель аналоговой части схемы индикации дуги по признакам хаотичности интервалов.

Индуктивные нагрузки сглаживают пульсации тока, из-за чего на допустимом по длительности контрольном интервале времени в 1...2 секунды может вообще не появиться импульсов на выходе рассматриваемой схемы, либо возникнуть пачка тесно расположенных импульсов при вспышке активности дуги (рис. 4.19). В цепях с резистивными нагрузками амплитуда пульсаций тока больше и импульсы распределяются более равномерно во времени (рис. 4.20). При возникновении «жёлтой» дуги (рис. 4.21) амплитуда пульсаций тока оказывается наименьшей и на выходе схемы отмечены только узкие, редкие импульсы. В цепях с ИВЭ РЭА схема имеет наивысшую эффективность. На рис. 4.22 импульсы, сформированные из относительно высокочастотного шума дуги, слились в сплошную полосу на участке интенсивной вспышки дуги, а на остальных участках образовали отдельные пачки.

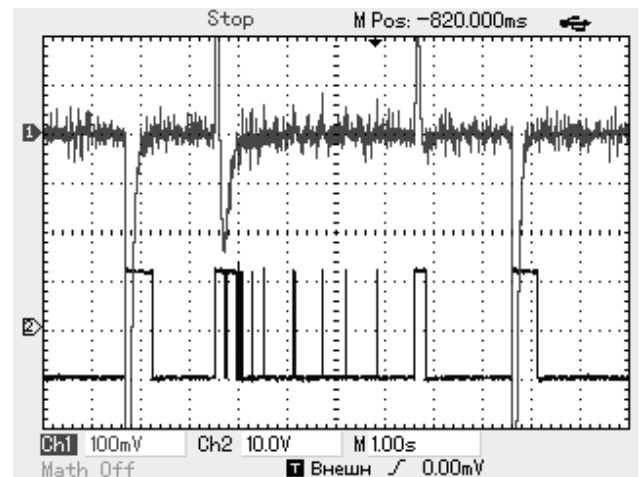
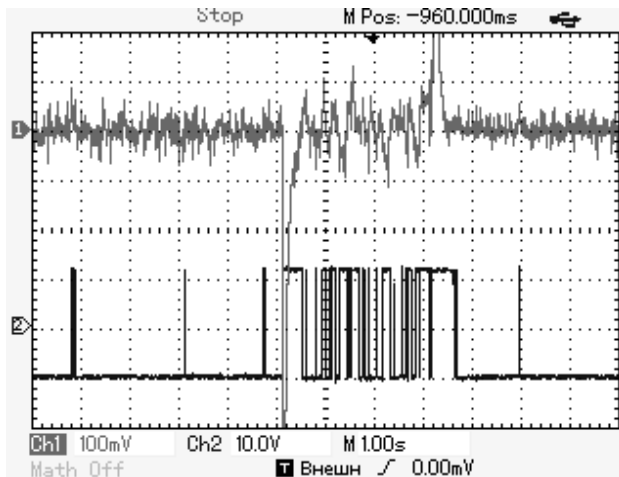




Рис. 4.19. Выходное напряжение схемы рис. 4.18 в цепи с  $RL$ нагрузкой,  $I_n=3$  А,  $U_{in}=40$  В.

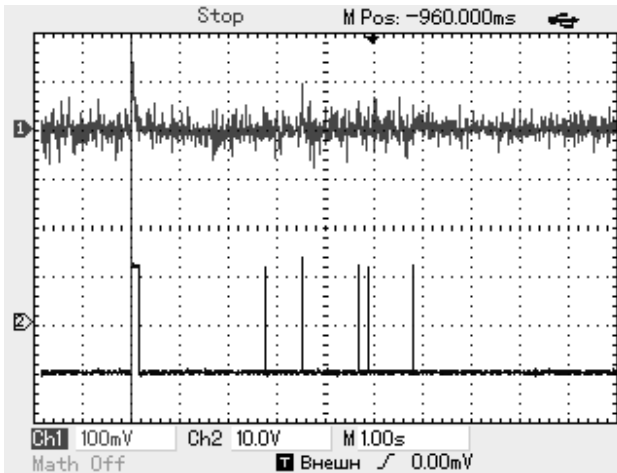


Рис. 4.21. Выходное напряжение схемы рис. 4.18 в цепи с  $RL$ нагрузкой,  $I_n=3$  А,  $U_{in}=40$  В (желтая дуга).

Для повышения эффективности схемы при работе на индуктивные нагрузки была проведена её модификация. Суть модификации – в принудительном увеличении количества импульсов на контрольном интервале путём дробления исходных импульсов. Этот результат достигается введением в схему нескольких формирователей импульсов (компараторов с различными опорными напряжениями) вместо одного, далее – дифференцированием полученных импульсов в каждом из каналов, суммированием полученных коротких треугольных импульсов, детектированием суммы и формированием окончательной последовательности импульсов с увеличением их количества в  $N$  раз (по числу компараторов) и сохранением факта хаотичности следования.

Самый простой метод отличия хаотической импульсной последовательности от периодической, реализованный на микроконтроллере, заключается в следующем.

В поступающей на вход контроллера импульсной последовательности проверяется равенство межимпульсных (нулевых) интервалов друг другу. Измерение интервалов начинается по событию прерывания по заднему фронту каждого импульса.

Рис. 4.20. Выходное напряжение схемы рис. 4.18 в цепи с ламповой нагрузкой,  $I_n=2,75$  А,  $U_{in}=40$  В.

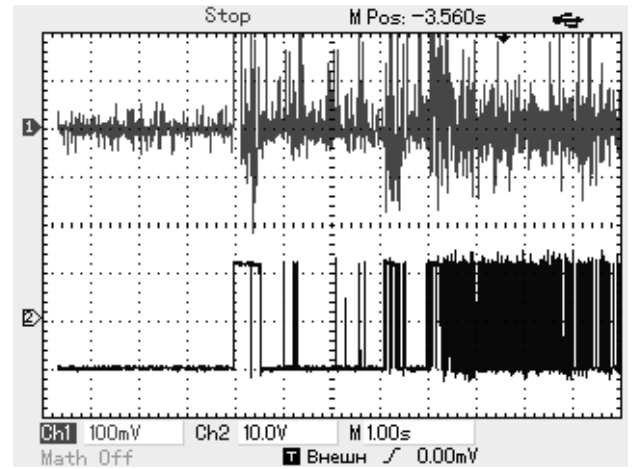


Рис. 4.22. Выходное напряжение схемы рис. 4.18 в цепи с ИВЭ,  $I_n=3$  А,  $U_{in}=30$  В.

Факт каждого неравенства нулевых интервалов фиксируется счетчиком процессора и при превышении допустимого числа неравенств формирует сигнал о наличии дуги. Через определенный интервал времени (например, через 1-2 секунды) происходит сброс процессора с обнулением накопленного числа неравенств.

Данный метод может отличить «хаотическую» последовательность от периодической последовательности с постоянными паузами. Любые неаварийные, периодические комбинации импульсов с разными паузами данный метод принимает за хаос.

К тому же для реализации этого метода необходимо подбирать, в зависимости от частоты импульсов, точность измерения временных интервалов. Слишком высокая точность, как и слишком низкая, приведут к ошибочному определению импульсов как дуги в последовательности с «дрожащими» фронтами.

Испытания программы на лабораторном стенде подтвердили недостатки метода. Горящую дугу процессор распознавал стабильно, но при этом принимал за «дугу» любые сформированные реальными полупроводниковыми схемами последовательности импульсов, даже периодические, если их источником был прибор с неидеальными фронтами.

Свободным от основных недостатков описанного метода является другой метод распознавания «хаоса», предлагаемый ниже.

Суть метода заключается в следующем.

Известно, что в хаотической последовательности импульсов отсутствуют какие-либо закономерности их чередования. Если на определенных отрезках времени существует некоторая повторяемость признаков (например, превышение суммарного времени единичных импульсов над суммарным временем нулевых импульсов), то это дает основание полагать, что последовательность не является хаотической и, следовательно, не может указывать на горение дуги.

Алгоритм программы состоит из следующих шагов:

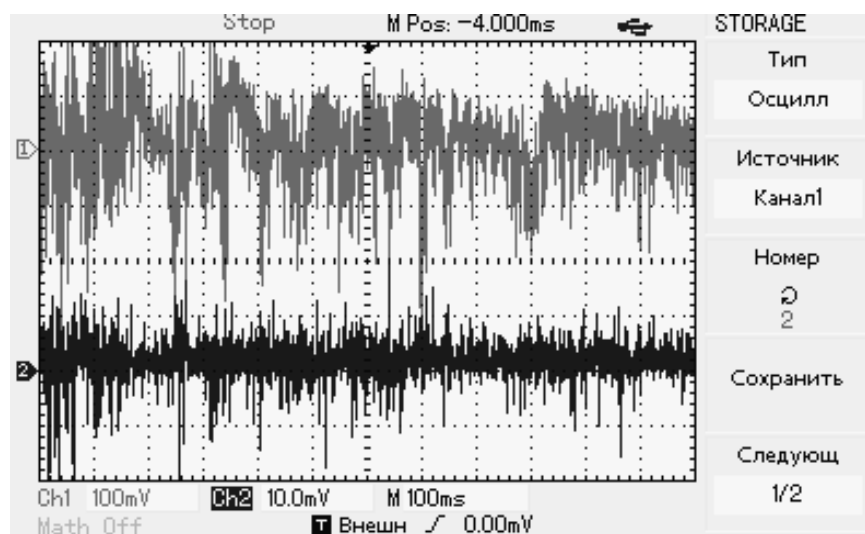
- отсчитываем определенное количество импульсов - суммируем единичные отрезки времени и запоминаем сумму в регистре «Plus»;
- суммируем нулевые отрезки времени и запоминаем сумму в регистре «Minus»;
- сравниваем содержимое регистров;
- если  $Plus > Minus$ , то этот факт фиксируется уменьшением содержимого счетчика 1 с предварительно установленным числом;
- если  $Plus < Minus$ , то этот факт фиксируется уменьшением содержимого счетчика 2, также с предварительно установленным числом;
- если один из счетчиков существенно (в 8-10 раз) превысил показания другого, то это обстоятельство фиксируется уменьшением ещё одного счетчика, с предварительно установленным числом;
- если факт превышения содержимого одного счетчика над другим повторился заданное число раз, то есть основание считать последовательность нехаотической, в обратном случае – хаотической.
- если «хаос» как признак дуги не выявлен, то все счетчики обнуляются каждую секунду и процесс повторяется сначала.

#### ***4.3 Методы борьбы с перекрёстными наводками от дуги.***

Эффективность методов индикации последовательной дуги, использующих её отличительные признаки, существенно ослабляется возможностью наводок в неповреждённые фидеры паразитных напряжений из аварийных проводов, лежащих в общем жгуте. Этот эффект, названный «перекрёстными наводками», может вызвать срабатывание защит одновременно в нескольких неповреждённых фидерах, массовое отключение их нагрузок, что является предпосылкой к катастрофической ситуации.

На рис. 4.23 приведены осциллограммы пульсаций токов в двух фидерах: аварийном (сверху) и неповреждённом (снизу), несущих токи

одинаковых нагрузок (3,5 А, медные контакты, зазор 0,2 мм). Фидеры механически объединены в витую пару на длине 3 м. Анализ осциллограмм обнаруживает два факта: полную качественную идентичность процессов и ослабление размаха пульсаций в нормальном фидере по отношению к аварийному в 10...12 раз. Однако, интенсивность наводки может быть значительно большей при большем токе в аварийном фидере, чем в нормальном и большей длине общей части жгута.



*Рис. 4.23. Пульсации дуги (вверху) и наводка от дуги (внизу) в неповрежденном фидере.*

Обнаружить аварийную цепь и уменьшить вероятность массовых сбоев защит можно при управлении нагрузками из общего территориального центра, содержащего многоканальные АЗК. При появлении сигнала о срабатывании защиты в любом из фидеров следует запустить механизм поочередного отключения фидеров на короткое время, достаточное для деионизации предположительно возникшей дуги (5...10 мс). В неповреждённых фидерах восстановятся нормальные процессы, а в повреждённом ток прекратится из-за образовавшегося разрыва цепи, что и укажет на место аварии. Данный алгоритм следует усложнить на случай прерывистой дуги несколькими повторными циклами контрольных отключений. Если после 5...10 циклов сохраняются признаки дуги и регулярные срабатывания защиты, следует окончательно отключить фидер.

Таким образом, рассмотренные в данной главе методы индикации дуги, основанные на обнаружении её «подписи» могут считаться достаточно эффективными при управлении нагрузками СЭС с помощью многоканальных АЗК, интегрированных в состав территориальных центров управления.

Результаты применимости рассмотренных методов индикации последовательной дуги в условиях авиационных СЭС постоянного тока обобщены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Методы индикации	Нагрузки фидеров СЭС 27 В постоянного тока					
	R	RL	ИВЭП	КДПТ	ШИМ-R	ИПН
Уровень шума	+	+	(1)	–	–	–
Хаос размаха	+	+	(3)	–	(4)	(4)
Хаос интервалов	+	(2)	(3)	–	(5)	(5)
Широкий спектр	+	+	(1)	–	–	–
Рекурсивность	+	+	(3)	–	–	–
Анализ спектра	+	+	(3)	–	–	–
Спад тока	+	+	+	–	(6)	(6)
Сравнение с эталонами	+	+	+	+	+	+

*Применимость рассмотренных методов индикации последовательной дуги в условиях авиационных СЭС постоянного тока.*

В таблице знаками «+» и «-» обозначены соответственно применимость и неприменимость методов; цифрами отмечены ссылки на условия применимости:

- (1) качественная фильтрация входных токов ИВЭ, отсутствие на входе ИВЭ конденсаторов большой емкости;
- (2) в цепях с малыми значениями индуктивности, либо с дополнительными мерами по увеличению количества импульсов на контрольном интервале;
- (3) устойчивая работа ИВЭ;
- (4) пониженная точность измерения размаха пульсаций;
- (5) пониженная точность измерения временных интервалов;
- (6) блокировка неаварийных процессов спада тока.

Итоговым результатом анализа таблицы является вывод о наличии ряда технических ограничений на индикацию дуги по её характерным признакам и об отсутствии таких ограничений на применимость метода индикации дуги на основе сравнения текущих процессов с эталонными, синтезированными с помощью аналоговых или цифровых моделей нагрузок. Вместе с тем имеются организационные проблемы получения подобных моделей.

#### **Выводы по главе 4.**

1. 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.

2. Разработаны функциональные схемы, аналоговые модели и цифровые узлы ИД, построенных по критерию наличия шума, для цепей с нерегулируемыми RL нагрузками. Работоспособность ИД подтверждена моделированием и испытаниями на лабораторном стенде.

3. 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.

4. Исследованы компьютерные модели и лабораторные макеты ИД, построенных по критериям рекурсии, наличие «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.

5. 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.

## ГЛАВА 5

### **Индикация последовательной дуги по отклонениям от нормальных процессов.**

В данной главе изложены результаты исследований и разработки методов индикации аварийных дуговых разрядов последовательного типа, основанных на возникновении в токе нагрузки изменений, нетипичных для нормальных процессов. Методы предполагают мониторинг тока нагрузки и его непрерывное сравнение с эталонными значениями тока, синтезированного в схеме индикации с использованием электронной модели нагрузки в аналоговом, либо цифровом виде. Достоинства методов – отсутствие необходимости в анализах параметров дуги и тот факт, что её возникновение обнаруживается по энергетическим изменениям в цепи нагрузки, нечувствительным к возможным наводкам. Недостатки методов – отсутствие универсальности к нагрузкам, необходимость в библиотеке моделей нагрузок, введённых в память защиты. Наибольшую трудность составляет здесь отсутствие доступных и достоверных технических описаний нагрузок, относящихся к цепям их питания, а также разнообразие нагрузок, особенно электронных, относящихся к разным поколениям. Требуются настройки параметров защит при смене номиналов тока и разработка поисковых алгоритмов для отслеживания изменений внутренних параметров нагрузок. Однако, в отличие от методов, отслеживающих признаки дуги, методы, основанные на контроле энергетических процессов, встречают только организационные, а не технические проблемы реализации.

Рассматриваемые методы трудно применять в бытовых системах, где возможна частая смена потребителей электроэнергии, но в авиационных СЭС с наперёд заданным комплектом нагрузок они вполне применимы.

#### ***5.1 Индикация дуги в цепях с индуктивно – активными нагрузками.***

К индуктивно-активным нагрузкам без пусковых токов относятся обмотки управления электромагнитными механизмами. К нагрузкам с



пусковыми токами можно отнести мощные электромагнитные контакторы, имеющие пусковую и удерживающую обмотки.

Условимся, что блок индикации дуги (индикатор дуги – ИД) является дополнением к несильной схеме управления и защиты (СУЗ) транзисторного аппарата защиты и коммутации (рис. 5.1). Питание ИД и СУЗ (как правило, двуполярным напряжением  $\pm 12...15\text{В}$ ) осуществляется от источника вторичного электропитания, входящего в состав АЗК. Сигнал о токе нагрузки снимается с резистивного датчика тока  $R_{\text{ДТ}}$  в составе АЗК. Кроме сигнала о токе блок индикации дуги получает информацию о напряжении в сети как разность потенциалов стока силового транзистора и анода блокирующего диода. В схему ИД поступает сигнал о включении силового транзистора АЗК ( $U_{\text{Вкл}}$ ). Из схемы ИД в схему СУЗ поступает команда об аварийном отключении АЗК.

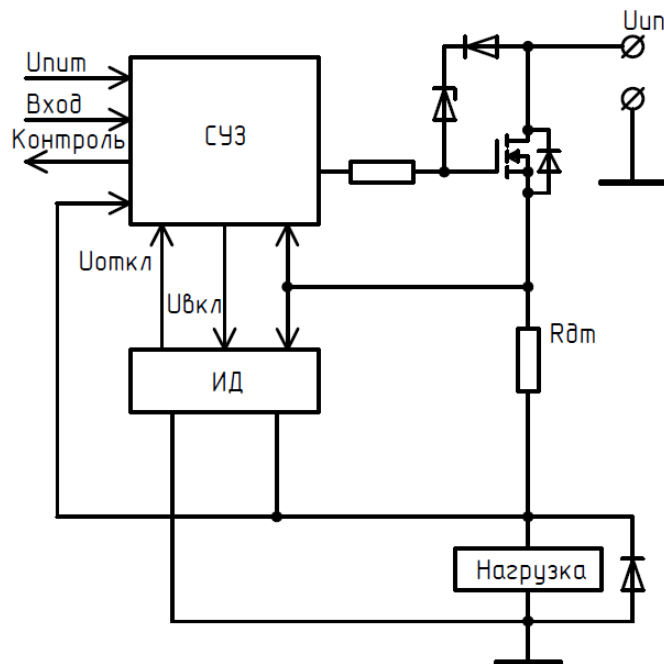


Рис. 5.1. Функциональная схема АЗК с индикатором дуги

#### 5.1.1 Использование аналоговых моделей нагрузок.

На рис. 5.2 приведена функциональная схема индикации дуги в цепи с индуктивно-активными нагрузками без пусковых токов с использованием аналоговой модели нагрузки [48]. На входе компаратора К1 сравниваются два сигнала: напряжение, пропорциональное току нагрузки и напряжение с

выхода модели нагрузки, выполненной в виде RC цепи ( $R2, C1$ ), питающейся от источника сетевого напряжения (источника питания  $U_{\text{ИП}}$ ) через ограничительный резистор  $R1$ .

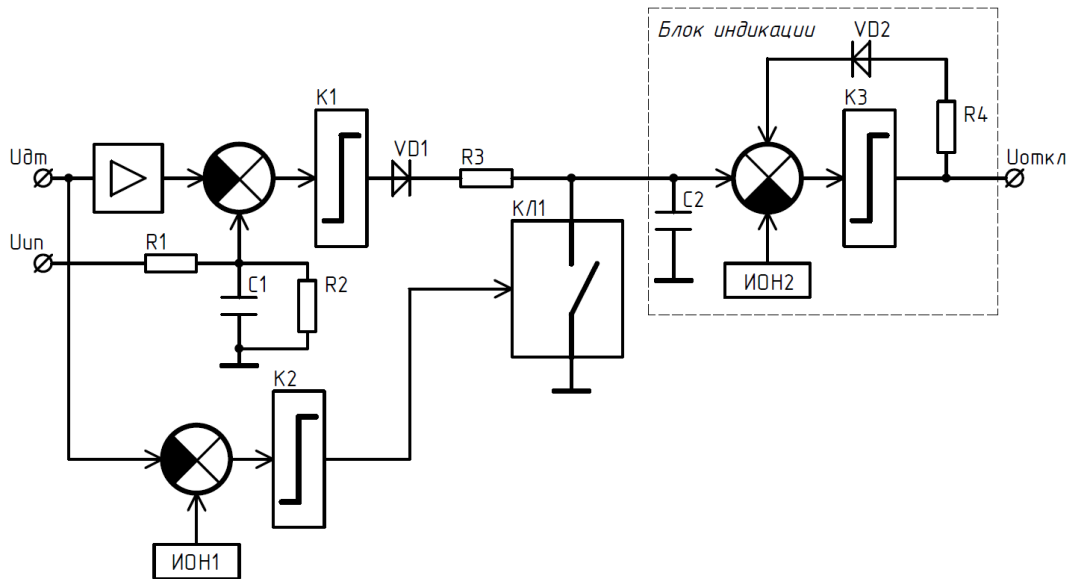


Рис. 5.2. Функциональная схема блока индикации дуги в цепи с  $RL$ -нагрузкой без пусковых токов на основе модели нагрузки.

Схема рассчитана так, что в неаварийном состоянии фидера напряжение с датчика тока  $U_{\text{ДТ}}$  больше, чем опорное напряжение на  $C1$  и на выходе компаратора  $K1$  – отрицательное напряжение, запирающее разделительный диод  $VD1$ . Конденсатор  $C2$  блока интегратора (БИ) не получает зарядного тока через резистор  $R3$ , на выходе блока – отрицательное напряжение. С возникновением дуги ток в цепи нагрузки снижается и становится меньше опорного уровня  $0,75 \cdot I_{\text{НОМ}}$ . На выходе  $K1$  появляется положительное напряжение, конденсатор интегратора начинает заряжаться. При  $U_{C2} > U_{\text{ИОН2}}$  компаратор  $K3$  переключается, положительное напряжение  $U_{\text{Откл}}$  на выходе блока поступает в схему управления АЗК в качестве команды на его отключение. Данное состояние запоминается сигналом обратной связи через  $VD2, R4$ . Компаратор  $K2$  с источником опорного напряжения ИОН1 и ключом  $KЛ1$  предназначен для блокировки интегратора в нормально отключённом состоянии АЗК, когда схема управления и защиты находятся под напряжением питания  $U_{\text{П.СУ}}$ , но ток в цепи нагрузки близок к нулю, т.е. меньше опорного уровня.

На рис. 5.3 приведена компьютерная модель блока индикации дуги. Схема содержит следующие узлы:

- силовой транзисторный ключ АЗК на МДП транзисторе M1 с датчиком тока R3 и источником управляющего напряжения V1;
- цепь нагрузки R1, L1 с блокирующим диодом D2;
- компаратор сравнения сигналов на операционном усилителе U1 с моделью нагрузки в виде резистивно-ёмкостной цепи R5, R6, C1;
- усилитель сигнала с датчика тока на U2;
- интегратор на U3 с источником опорного напряжения V15, зарядным резистором R11 и накопительным конденсатором C2;
- компаратор нулевого тока на U4 с делителем R13, R14;
- транзисторный ключ Q1, блокирующий конденсатор интегратора;
- комбинированная цепь, состоящая из источников напряжения V2, V4, ключа S1 и диода D1, выполняющая роль дуги; где напряжение на дуге заменено источником постоянного напряжения V2, а момент возникновения дуги задаётся источником импульсного напряжения V4;
- источник переменного синусоидального напряжения V12 с амплитудой и частотой, соответствующими пульсациям напряжения сети;
- комбинация из трёх источников постоянного напряжения (V5, V9, V11), пяти источников импульсного напряжения (V3, V6, V7, V8, V10) и пяти ключей S2...S6, выполняющая роль источника напряжения сети с параметрами, соответствующими требованиям технического руководства КТ-160 [47]; блок питания схемы нормированным испытательным напряжением и блок интегратора, выделенные пунктиром, в дальнейшем при повторении их технического содержания раскрываться до элементов не будут.

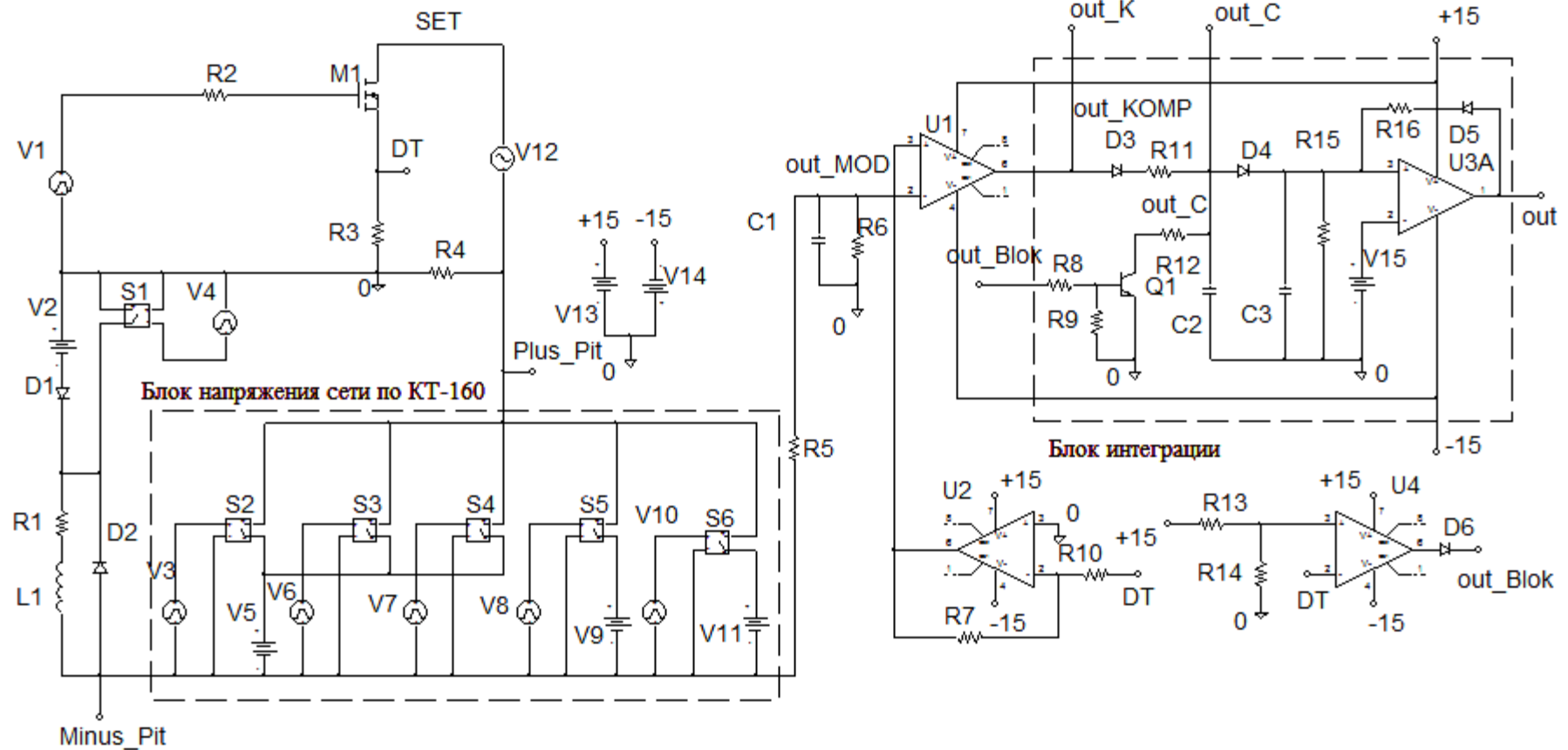


Рис. 5.3. Компьютерная модель ИД с эквивалентом нагрузки и блоком питания по КТ-160.

На рис. 5.4, 5.5 приведены временные диаграммы процессов в схеме рис. 5.3.

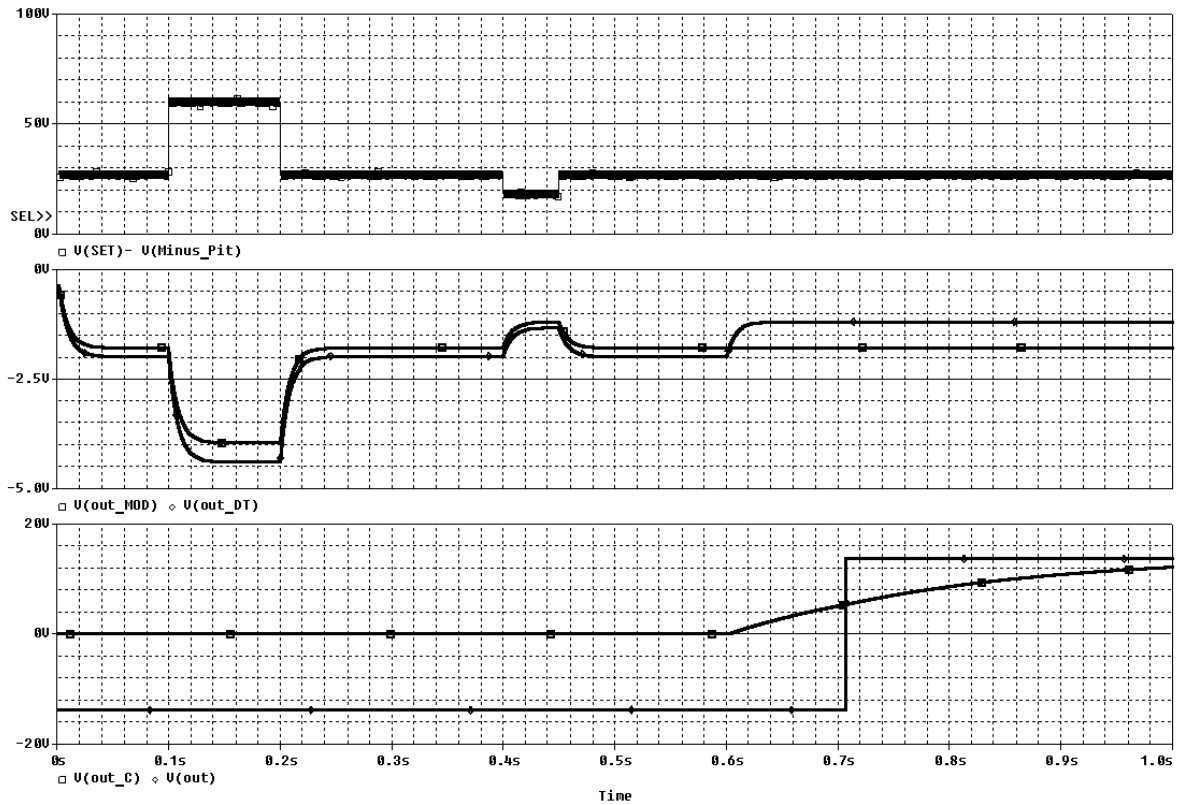


Рис. 5.4. Процессы в схеме ИД на рис. 5.3 при индикации спокойной дуги.

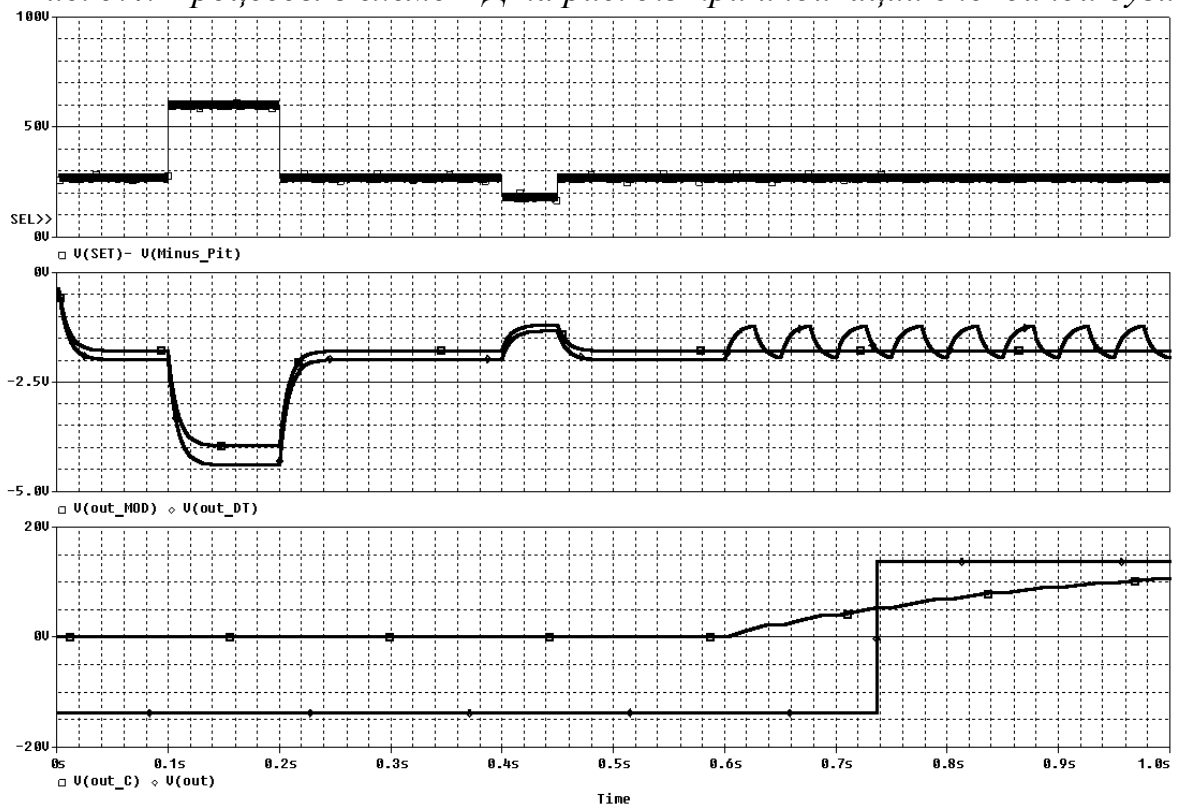


Рис. 5.5. Процессы в схеме рис. 5.3 при индикации прерывистой дуги.

Верхняя диаграмма на рис. 5.4 – напряжение сети с текущими значениями: 27В-60В-27В-18В-27В. Общее время процесса – 1 секунда.

Средняя диаграмма – напряжения на входах сравнивающего компаратора. До момента возникновения дуги (через 0,6 с после начала процесса) напряжение на неинвертирующем входе меньше, чем на инвертирующем и напряжение на выходе компаратора отрицательно. С появлением дуги ток в цепи падает ниже опорного уровня, напряжение на неинвертирующем входе становится больше, чем на инвертирующем, компаратор переключается и начинается заряд конденсатора интегратора.

На нижней диаграмме отражены напряжение на конденсаторе С2 и на выходе схемы. Интервал задержки отключения АЗК после возникновения дуги установлен равным 100 мс, что делает схему нечувствительной к кратковременным помехам.

На рис. 5.5 приведены диаграммы процессов ликвидации прерывистой дуги с частотой 20 Гц и скважностью  $Q=2$ . Схема работоспособна на прерывистую дугу, но время срабатывания возросло до 130 мс.

На верхних диаграммах процессов просматриваются пульсации сетевого напряжения, введённые в схему индикации дуги в качестве помехи её работе. В первом случае – с амплитудой 0,8 В и частотой 200 Гц, во втором случае с амплитудой 2 В и частотой 1000 Гц. Присутствие нормированных пульсаций напряжения сети не вызвало нарушений в работе схемы.

На рис. 5.6 приведена компьютерная модель схемы индикации дуги в цепи с RL нагрузкой без пусковых токов, питающейся от авиационной сети с реальной формой напряжения в переходных режимах. Формирователь напряжения сети здесь состоит из двух источников постоянного напряжения 27 В (V5, V8), источника синусоидального напряжения V7, модулированного экспонентой. Изменение фазы напряжения с  $90^\circ$  С на  $-90^\circ$  С соответствует замене режима системы с отключением мощной нагрузки на режим её включения. На рис. 5.7 приведены временные диаграммы процессов при

отключении и включении мощной нагрузки. Анализ диаграмм свидетельствует о том, что изменение характера переходного напряжения сети не повлияло на работоспособность схемы индикации дуги.

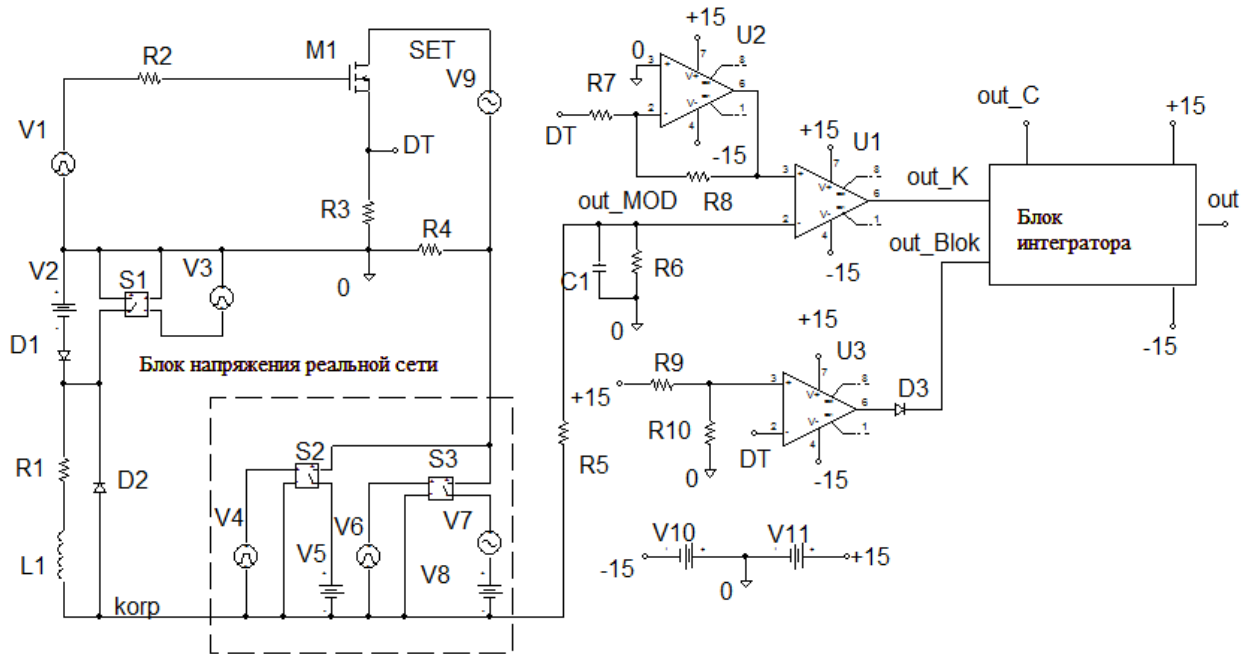


Рис. 5.6. Компьютерная модель ИД с эквивалентом  $RL$  нагрузки и блоком напряжения реальной сети.

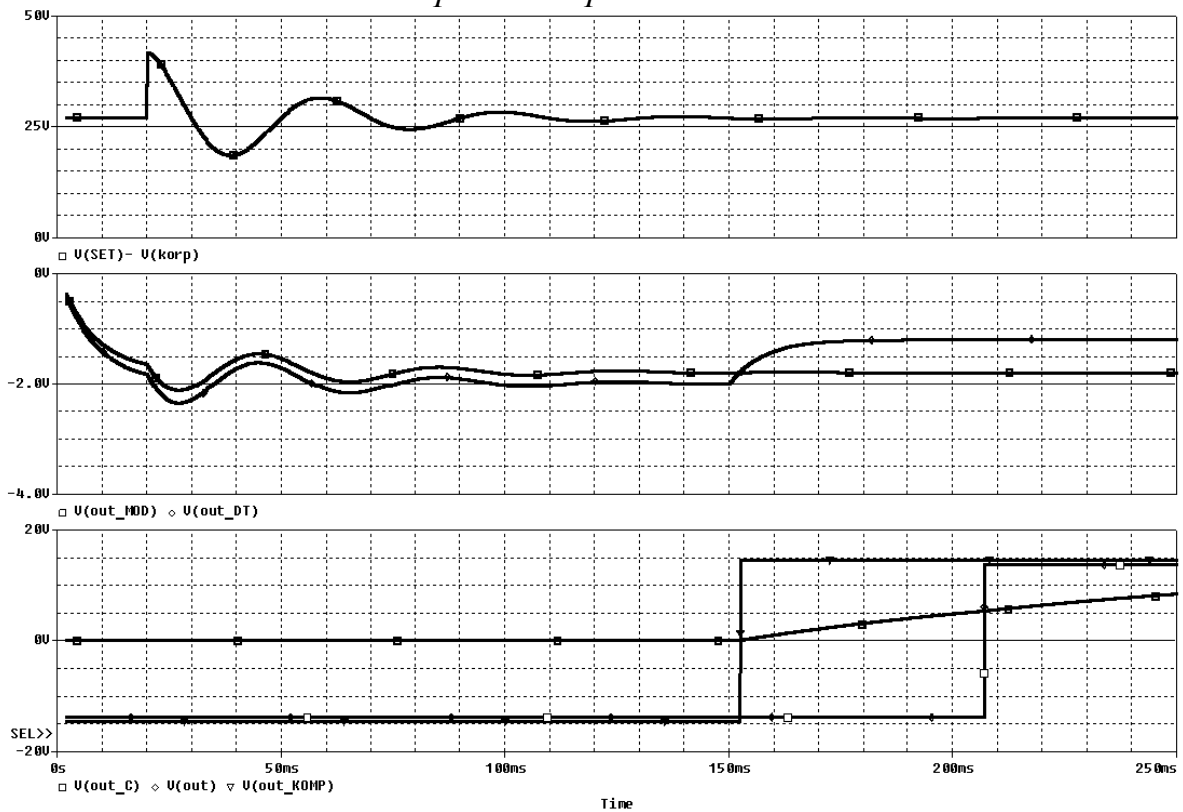


Рис. 5.7. Временные диаграммы в схеме на рис. 5.6 при отключении мощной нагрузки в СЭС.

### 5.1.2. Контроль за изменением средних значений токов

Рассмотрим теперь способы индикации дуги в цепях с RL нагрузками, имеющими пусковые токи. Электромагнитные контакторы, представляющие данный класс нагрузок, достаточно разнообразны по своим электрическим параметрам, что делает затруднительным использование полных моделей для их описания. Схемы упростятся, если отслеживать не мгновенные, а только средние значения тока, а в основу моделей нагрузок, построенных с учётом средних значений токов и напряжений, положить статические вольтамперные характеристики (ВАХ) нагрузок, описывающих цепи их питания [49]. Описание нагрузок упрощается, однако при возникновении неаварийных переходных процессов на срабатывание защиты должен накладываться запрет.

На рис. 5.8 приведена функциональная схема ИД для цепей с RL нагрузками, имеющими пусковые токи.

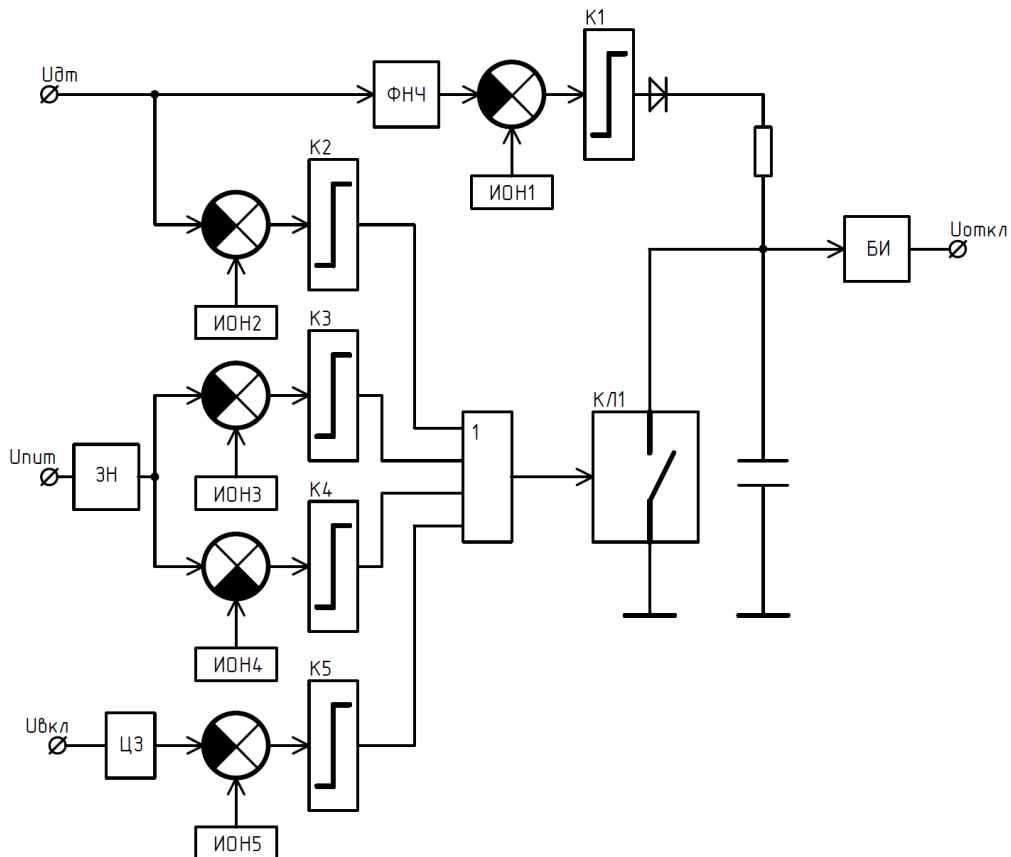


Рис. 5.8. Функциональная схема ИД для RL-нагрузок с пусковыми токами.



Среднее значение тока сравнивается на входе компаратора К1 с опорным уровнем тока, установленного по результатам исследований, изложенных в главе 3, на 25...30 % ниже номинального. Переходные отклонения напряжения сети контролируются компараторами К3 и К4, настроенными на верхнюю и нижнюю границы поля допуска установившихся режимов сети (32 В и 24 В). Пусковой режим нагрузки блокируется цепью временной задержки Ц3 и компаратором К5. Компаратор К2 отслеживает режим нулевого тока.

На рис. 5.9 приведена компьютерная модель ИД. Собственно модель содержит следующие узлы:

- компаратор сравнения на микросхеме U1;
- интегратор, описанный в схеме на рис. 5.3 с диодной матрицей на входе блокировки;
- компараторы повышенного и пониженного напряжений сети на микросхемах U3, U5;
- каскад временной задержки на R16, C2, U4;
- компаратор нулевого тока на U2;
- двухкаскадное «зеркало тока» на транзисторных парах Q1-Q2 и Q3-Q4, передающее информацию о напряжении сети в схему ИД относительно её общей точки.

Узлы, не входящие в модель:

- силовой МДП ключ АЗК на M1 с датчиком тока R10 и отключающим транзистором Q5;
- цепь нагрузки, содержащая дроссель L1, резисторы R12 и R13, отражающие сопротивления удерживающей и пусковой обмоток и коммутирующий их ключ S6;
- комбинация источников постоянного напряжения, переключателей и управляющих источников, описанная в схеме на рис. 5.3 и воспроизводящая испытательные циклы напряжения сети.

Пунктиром выделен каскад блокировок, содержащий четыре узла: узел нулевого тока, блокировки пусковых режимов, блокировки переходных режимов сети.

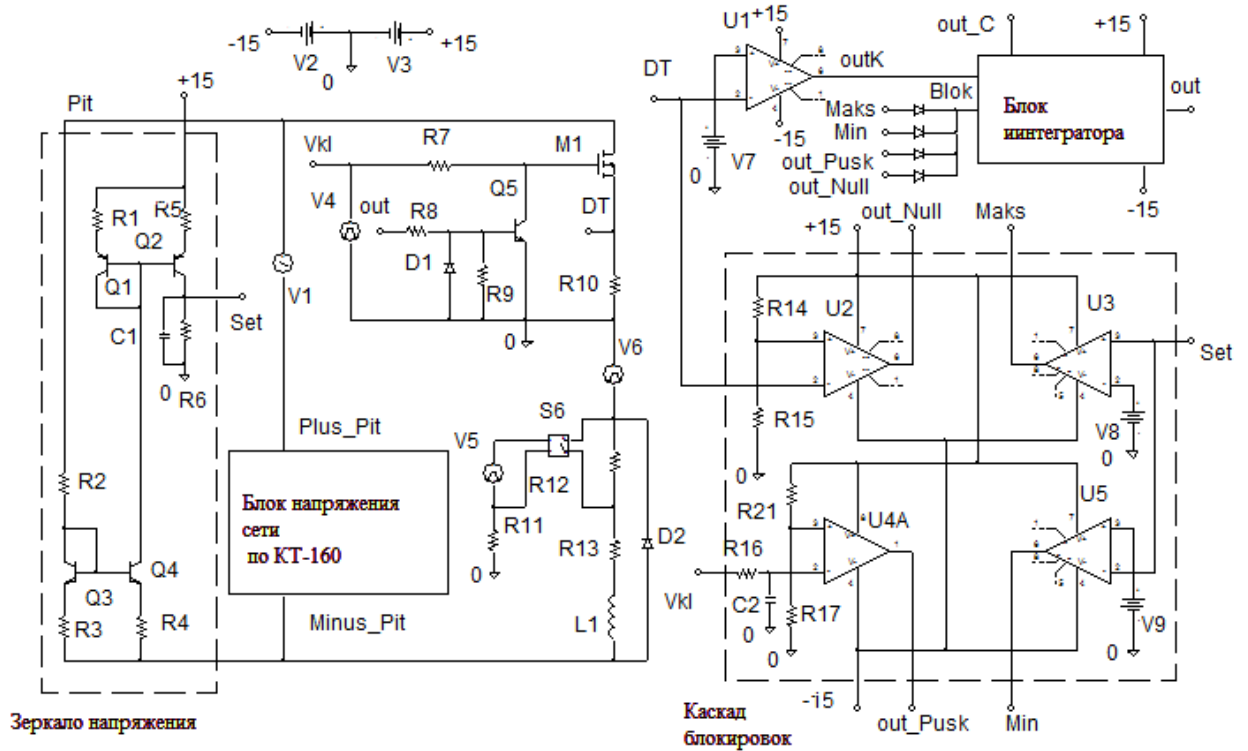


Рис. 5.9. Компьютерная модель ИД для  $RL$ -нагрузок с пусковыми токами.

На рис. 5.10 приведены временные диаграммы процессов в схеме рис. 5.9 при ликвидации спокойной дуги. Содержание диаграмм таково: верхняя – напряжение с датчика тока, средняя – напряжения с выходов каскадов, блокирующих интегратор при пуске ( $out\_Pusk$ ), повышении напряжения сети ( $Maks$ ) и понижении этого напряжения ( $Min$ ). На нижней диаграмме приведены напряжения на выходе сравнивающего компаратора ( $out\_K$ ), конденсаторе интегратора ( $out\_C$ ) и выходе всей схемы ( $out$ ). Результаты моделирования иллюстрируют работоспособность схемы в рамках технологических изменений тока нагрузки относительно его номинального значения ( $\pm 10...15\%$ ).

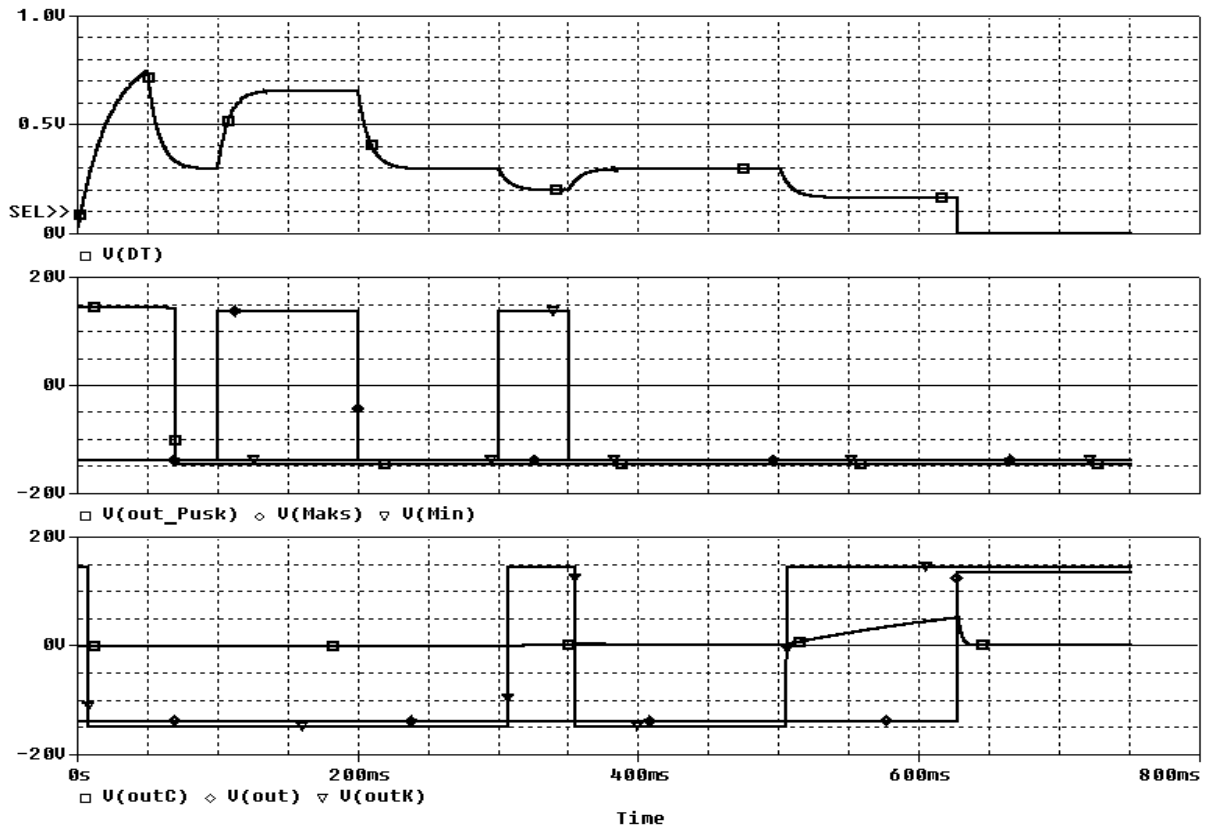


Рис. 5.10. Временные диаграммы в схеме на рис. 5.12 при ликвидации спокойной дуги.

### 5.1.3. Блокировка индикации дуги при плавных неаварийных изменениях тока нагрузки.

При работе авиационных систем в широком температурном диапазоне к технологическим изменениям тока могут добавиться существенные температурные изменения. Так, например, сопротивления обмоток электромеханизмов, намотанных медными проводами, могут увеличиться при нагреве на 100 °С примерно на 30...40 %, что в сумме с технологическими изменениями составит 50...60 % и уменьшение тока, вызванное нагревом, окажется неотличимым от действия дуги.

Единственным отличием останется скорость уменьшения тока – медленное при нагреве и существенно более быстрое при дуге. Для того, чтобы избежать ложных отключений схемы индикации дуги при медленных изменениях тока, можно дополнить её блоком «выборки-хранения», который будет изменять опорный уровень компаратора сравнения вслед за медленным изменением текущего значения тока.



- усилитель сигнала с датчика тока на U2;
- генератор выборки в виде источника импульсного напряжения V5 с делителем R18, R19;
- ждущий мультивибратор на операционном усилителе U5 с времязадающим конденсатором C8 и цепями запуска C3, R17 и C4, R15;
- блок дифференцирования на операционном усилителе U1 с форсирующей цепью C1, R1;
- ключ блокировки выборки на транзисторе Q7;
- логические схемы в виде диодных матриц.

Остальные блоки аналогичны описанным ранее.

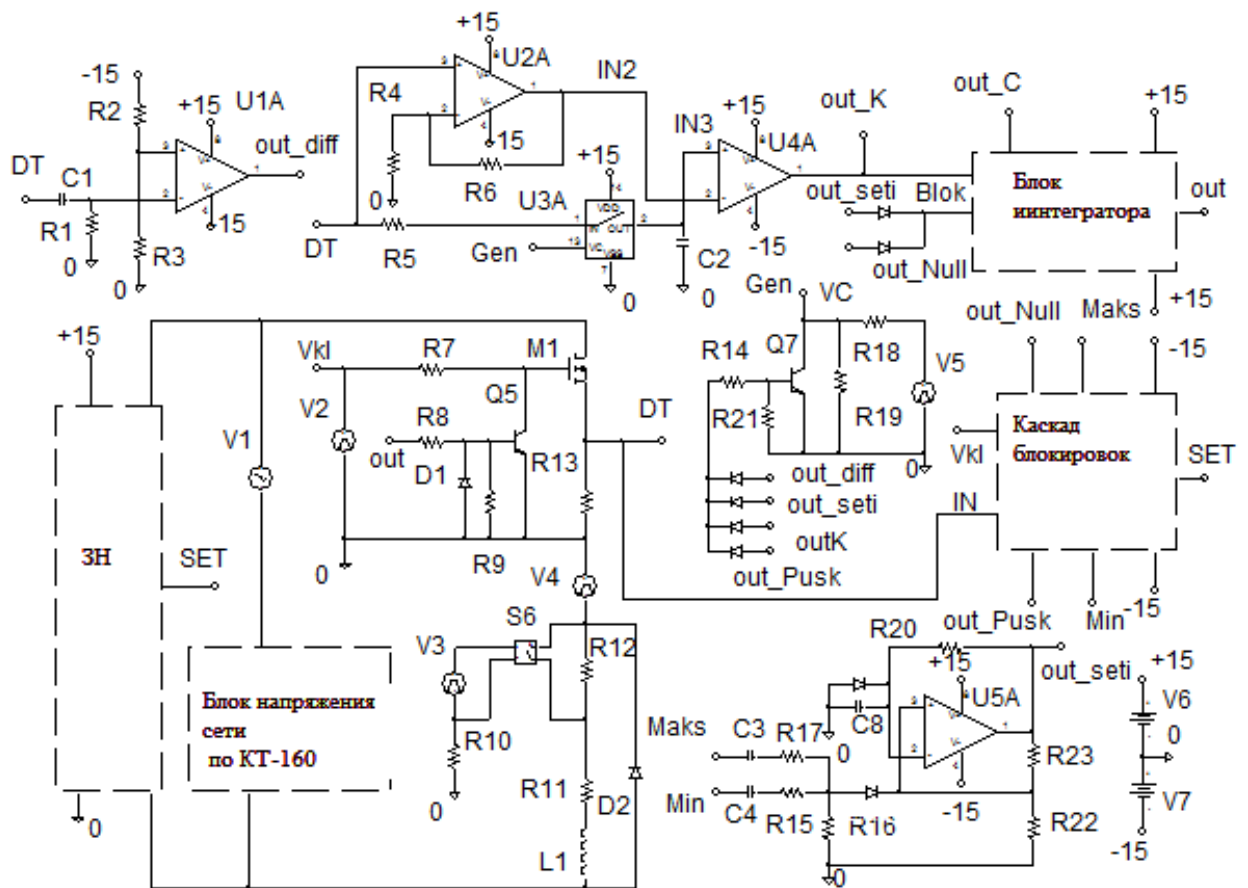


Рис. 5.12. Компьютерная модель ИД с УВХ для цепей с  $RL$  нагрузками.

На рис. 5.13, 5.14 приведены временные диаграммы процессов в компьютерной модели схемы индикации. Рис. 5.13 иллюстрирует работу схемы при отсутствии дуги и медленном изменении тока нагрузки, которое

воспроизводится плавным увеличением напряжения источника V4, начиная с точки 0,6 с. Верхняя диаграмма воспроизводит синхронное изменение сигналов с датчика тока и с опорного конденсатора, так что первое остаётся всегда больше второго в 1,25 раз. Средняя диаграмма отражает блокирующее действие дифференцирующего каскада на процесс выборки на участках резких уменьшений тока. Нижняя диаграмма иллюстрирует работу остальных цепей блокировок (пускового режима «out\_Pusk», переходных режимов сети «out\_seti», нулевого тока в фидере «out\_Null»), отсутствие напряжения на конденсаторе интегратора и отрицательное напряжение на выходе устройства. На рис. 5.14 приведены диаграммы работы ИД в режиме ликвидации устойчивой дуги. Содержание диаграмм аналогично рис. 5.13. В момент возникновения дуги дифференцирующий каскад, уловив резкое уменьшение тока в фидере, блокирует выборку, сохраняя тем самым постоянство опорного напряжения. Напряжение на опорном входе сравнивающего компаратора становится больше напряжения сигнала о токе, компаратор срабатывает, поддерживая блокировку выборки своим выходным напряжением «out\_K», начинается заряд конденсатора в интеграторе и через 120 мс следует отключение АЗК.

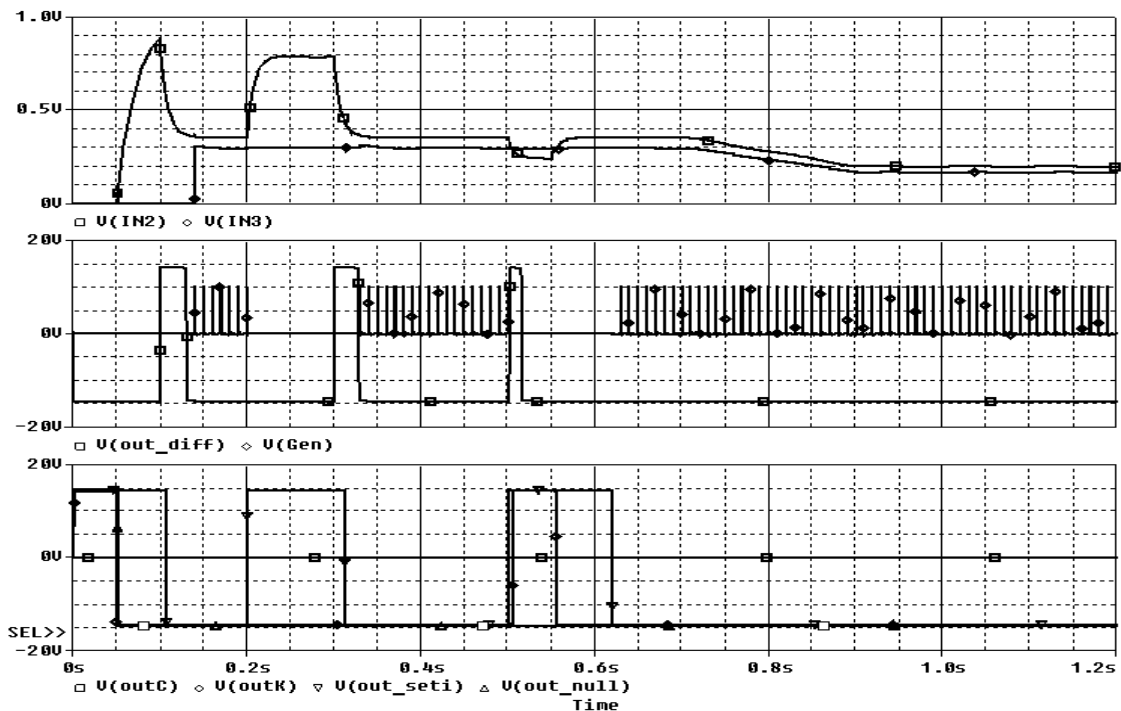


Рис. 5.13. Процессы в схеме на рис.5.12 при плавном изменении тока нагрузки.

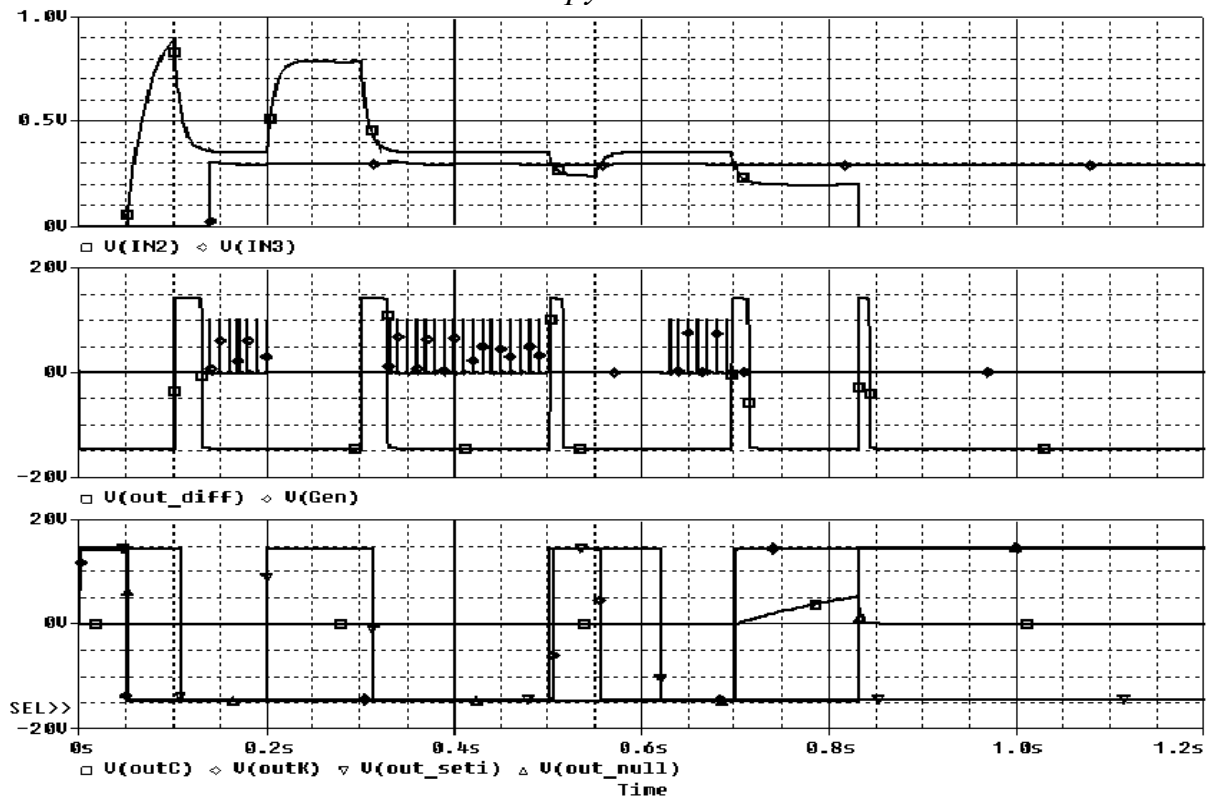
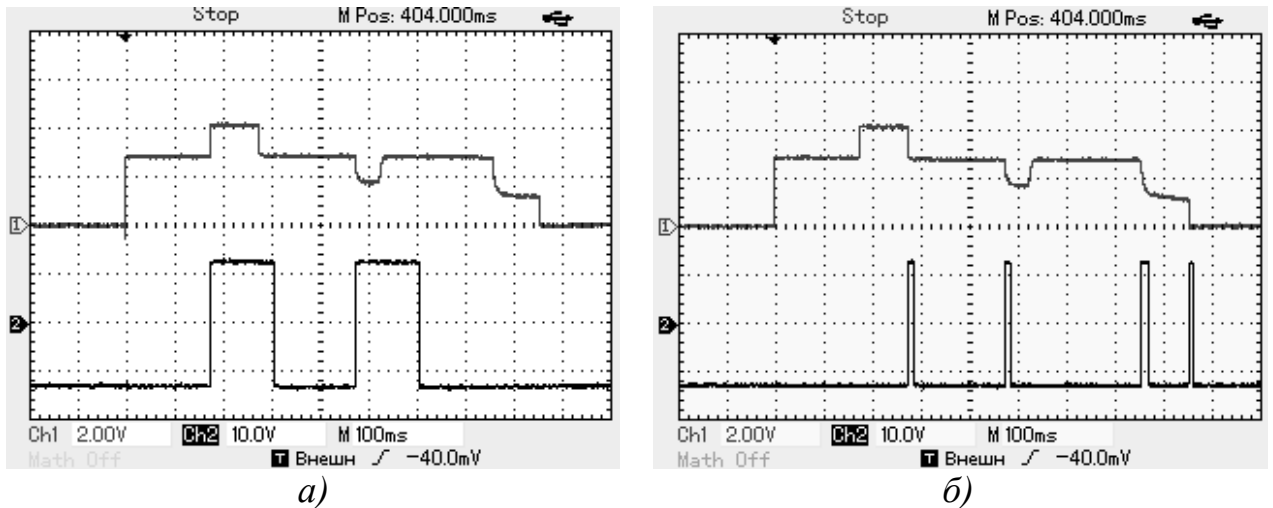


Рис. 5.14 Процессы в схеме на рис. 5.12 при ликвидации спокойной дуги.

На рис. 5.15 приведены осциллограммы процессов ликвидации спокойной дуги в схеме, приведённой на рис. 5.12, выполненной в виде лабораторного макета. Верхние осциллограммы на обоих рисунках – токи в цепи с индуктивно-активной нагрузкой, отражающие включение цепи, всплеск напряжения сети, провал напряжения сети, возникновение дуги, задержку срабатывания ИД и аварийное отключение фидера нагрузки. Нижняя осциллограмма на рис. 5.15: а) напряжение с выхода одновибратора, обеспечивающее блокировку выборки на интервалах переходных изменений напряжения сети. Нижняя осциллограмма на рис. 5.15: б) напряжение с выхода дифференцирующего каскада, обеспечивающее блокировку выборки на интервалах резких падений тока, включая интервал возникновения и развития дуги.



*Рис. 5.15. Осциллограммы процессов ликвидации дуги в лабораторном макете схемы рис. 5.12: а) ток нагрузки и напряжение с выхода одновибратора; б) ток нагрузки и напряжение с выхода дифференцирующего каскада.*

## **5.2 Индикация дуги в цепях с резистивными нагрузками.**

К резистивным нагрузкам относятся нерегулируемые лампы накаливания, нерегулируемые нагревательные приборы, а также осветительные и обогревательные устройства с ШИМ регулированием мощности.

### **5.2.1. Нерегулируемые резистивные нагрузки**

Индикация дуги в нерегулируемых устройствах как и ранее производится по уменьшению среднего тока нагрузки более, чем на 25...30 % от номинального значения. В отличие от медных обмоток электромагнитных устройств, сопротивления ламп накаливания и нагревательных элементов (рабочие элементы которых выполняются из тугоплавких материалов и нагреваются до сотен градусов) увеличиваются в рабочем диапазоне внешних температур относительно мало. Это исключает необходимость усложнения схем каскадами выборки-хранения. Функциональная схема ИД для цепей с нерегулируемыми нагрузками отличается от ранее рассмотренной схемы для RL нагрузок, приведённой на рис. 5.8, только наличием обязательного фильтра низких частот в канале



измерения тока, который служит для ослабления сетевых помех, начиная с частоты 200 Гц.

На рис. 5.16 приведена компьютерная модель схемы индикации дуги. Модель содержит элементы S1, V5, воспроизводящие бросок тока через холодную нить лампы, или нагревательного элемента при их включении. Низкочастотный фильтр, ослабляющий сетевые помехи, выполнен двухкаскадным и пассивным (R1, R2, C1, C2). На рис. 5.17 приведены диаграммы, иллюстрирующие работоспособность ИД при ликвидации спокойной дуги. Верхняя диаграмма – напряжение сети, пересчитанное через «зеркало тока» с ослаблением в 10 раз: здесь видны сетевые помехи (амплитуда 2 В, частота 1000 Гц). Средняя диаграмма – напряжение на выходе фильтра в сравнении с напряжением опорного источника: сетевые пульсации заметно ослаблены. Нижняя диаграмма – напряжение с выхода каскада задержки «out\_Pusk», блокирующее интегратор, напряжение на конденсаторе интегратора «out\_C» и напряжение на выходе блока «out», отключающее АЗК.

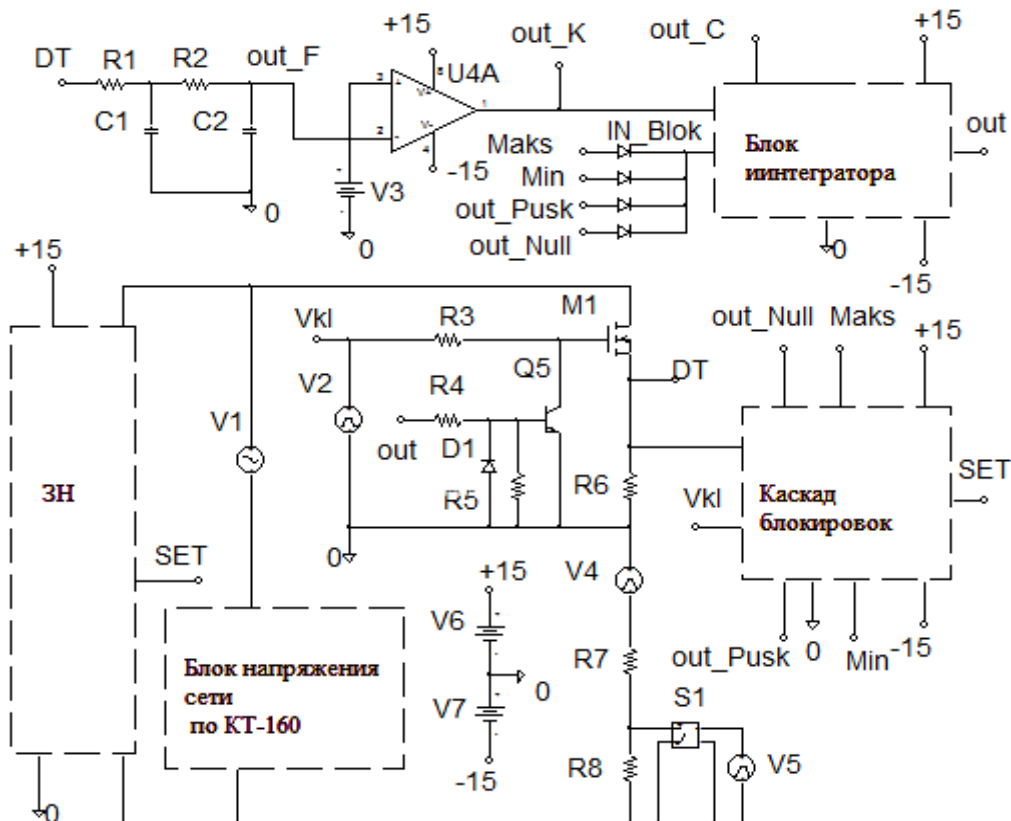


Рис. 5.16. Компьютерная модель ИД для цепей с нерегулируемыми резистивными нагрузками.

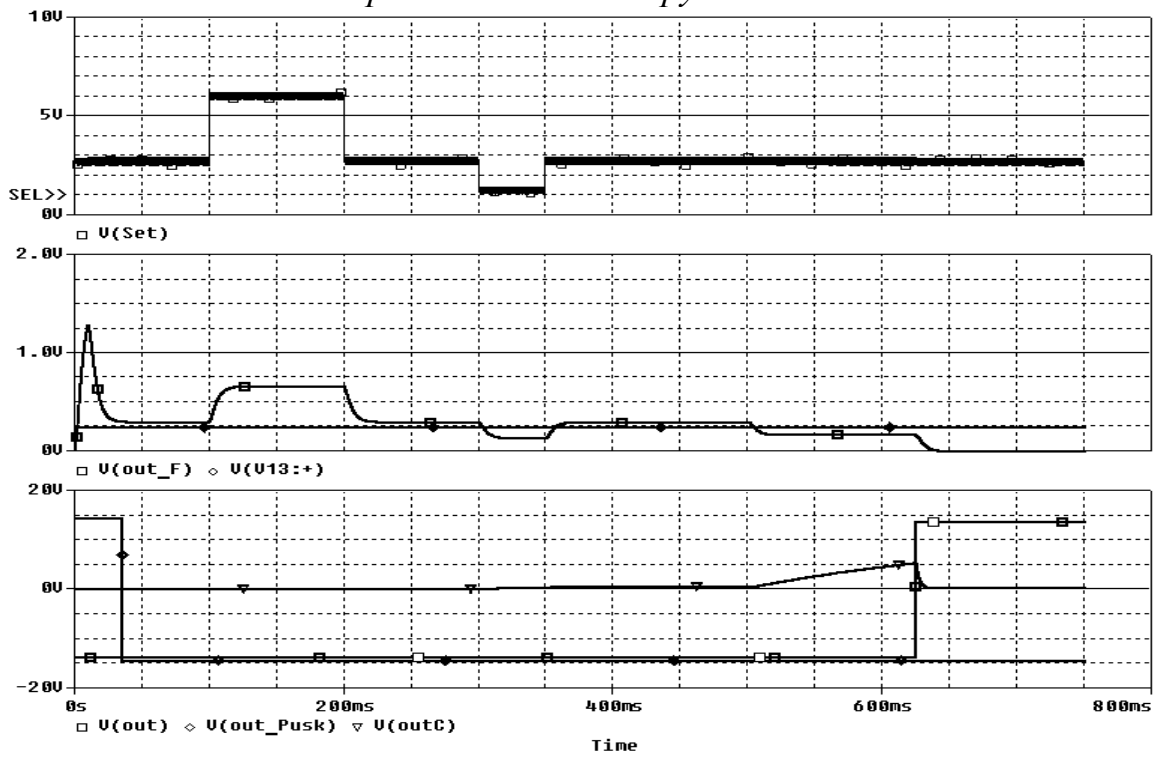


Рис. 5.17. Процессы в схеме на рис. 5.16 при ликвидации спокойной дуги.

### 5.2.2. Регулируемые нагрузки с ШИМ-управлением.

Рассмотрим теперь метод индикации дуги в цепях с регулируемыми резистивными нагрузками. Метод основан на контроле тока нагрузки во время импульса и сравнении его с двумя опорными уровнями, один из которых на 25...30 % ниже номинального, а другой – на 5 % выше нулевого. При уменьшении тока в импульсе ниже первого уровня, но не до нуля, диагностируется последовательная дуга. На рис. 5.18 приведена функциональная схема ИД. Сигнал с датчика тока сравнивается на входах компараторов К1 и К2 с нижним и верхним опорными уровнями. Если напряжение с датчика тока меньше верхнего, но больше нижнего уровней, то на выходах компараторов появятся максимальные положительные напряжения, создающие одинаковые токи в резисторах R1 и R2, суммирующиеся в резисторе R3. Напряжение на R3 оказывается больше, чем напряжение опорного источника ИОН5. компаратор К3 срабатывает, вызывая заряд конденсатора в интеграторе. На рис. 5.19 приведена компьютерная модель схемы. Компаратор уровня тока дуги выполнен на микросхеме U1, а компаратор нулевого уровня – на микросхеме U2. На рис. 5.20 приведены временные диаграммы процессов ликвидации спокойной дуги. Верхняя диаграмма – напряжение сети с сетевыми помехами (0,8 В, 200 Гц), пересчитанное через «зеркало тока». Средняя диаграмма – напряжение с датчика тока. На нижней диаграмме - напряжения на выходах компараторов сети «Max», «Min», напряжение на конденсаторе интегратора «out\_C» и напряжение на выходе блока «out», отключающее АЗК.

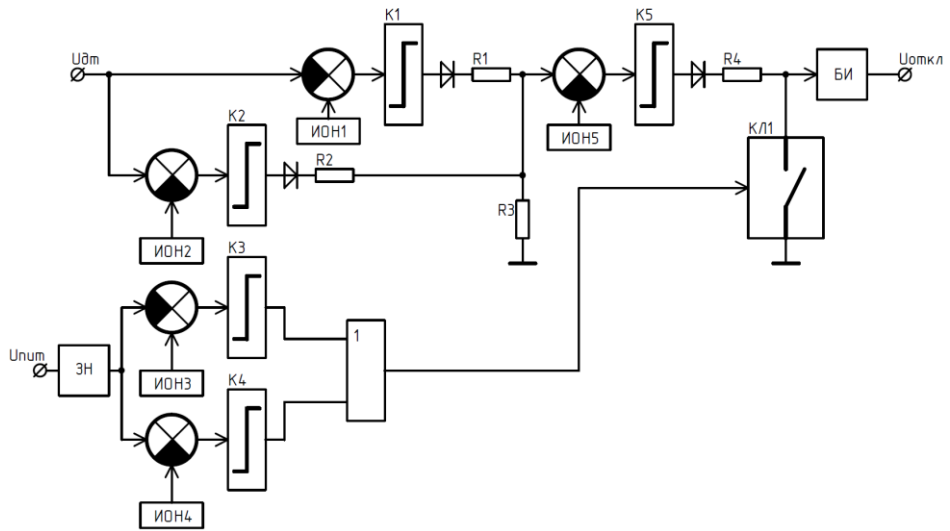


Рис. 5.18. Функциональная схема ИД для цепи с регулируемой резистивной нагрузкой.

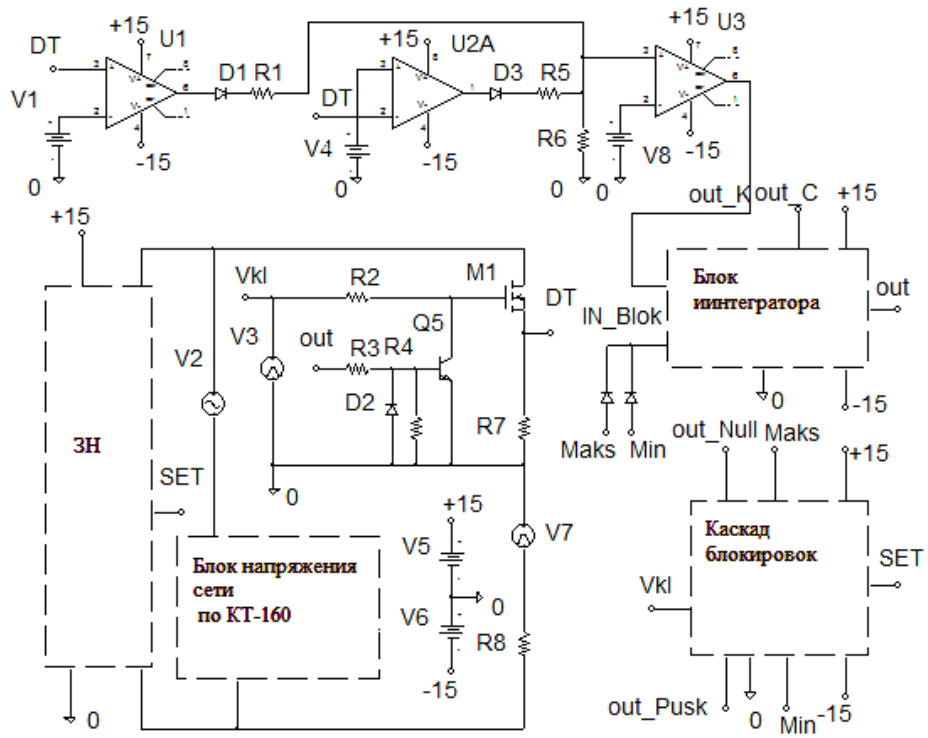


Рис. 5.19. Компьютерная модель ИД для регулируемой резистивной нагрузки.

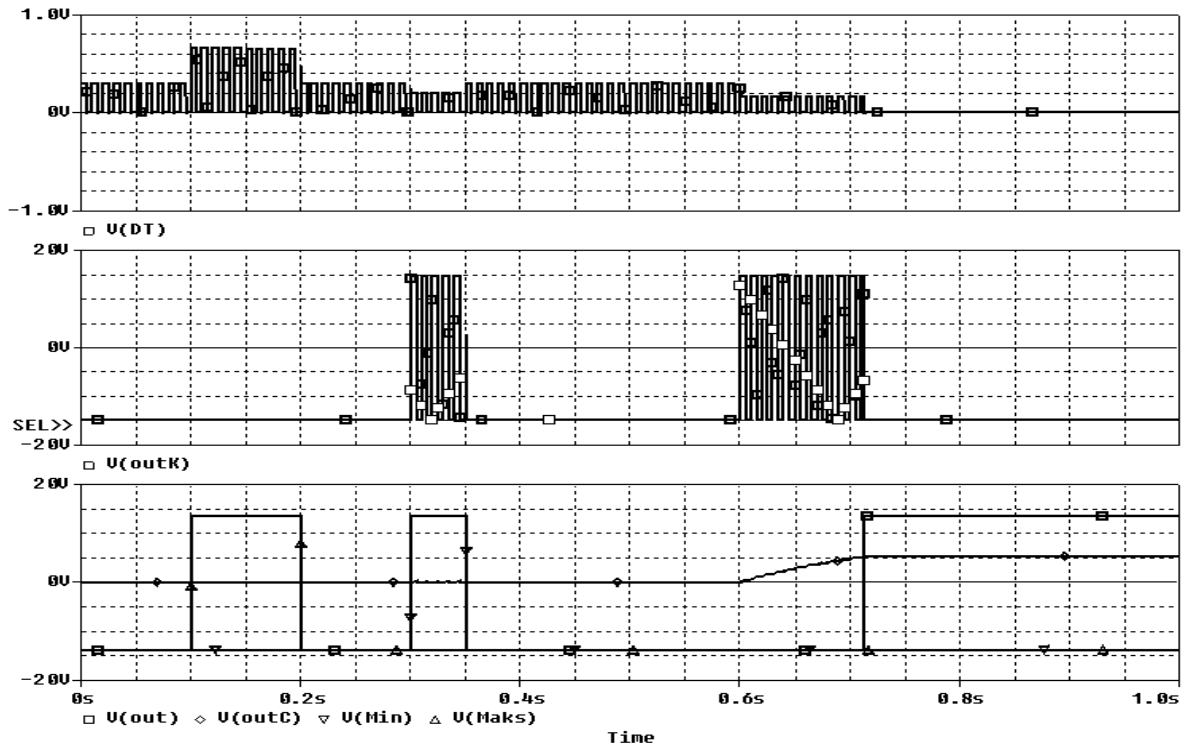


Рис. 5.20. Процессы в схеме на рис. 5.24 при ликвидации спокойной дуги.

### 5.3 Индикация дуги по характерным свойствам нагрузок.

#### 5.3.1. ИВЭ РЭА с постоянной выходной мощностью.

В отличие от резистивных и индуктивных нагрузок, токи которых уменьшаются при появлении дуги, ток, потребляемый стабилизированным ключевым ИВЭ РЭА по цепи его питания, с возникновением дуги увеличивается по закону:

$$I_{\Pi} = P_{\text{ИВЭ}} / (U_{\text{ИП}} - U_{\text{д}})$$

где:  $P_{\text{ИВЭ}}$  – мощность, потребляемая ИВЭ по цепи его питания,  $U_{\text{д}}$  – падение напряжения на дуге.

Ток, потребляемый ИВЭ непрерывного типа, при появлении дуги не изменится, но мы будем считать наличие таких ИВЭ с относительно большой мощностью исключением из правил, по которым с целью экономии энергии большинство современных и перспективных ИВЭ РЭА выполняются по схемам с широтно-импульсной, либо релейной стабилизацией выходного напряжения. Примем также, что нагрузка ИВЭ в процессе его

функционирования заметно не изменяется. Другие варианты будут рассмотрены дополнительно.

Функциональная схема ИД в цепи с ИВЭ РЭА, приведённая на рис. 5.21, имеет значительное сходство со схемой на рис 5.8. Различие состоит в логике работы компаратора К1, который теперь срабатывает при увеличении, а не при уменьшении тока в фидере нагрузки. Компьютерная модель на рис. 5.22 имеет ряд особенностей:

- нагрузкой ИД является понижающий ИВЭ релейного типа, замкнутый ООС по выходному напряжению; выходное напряжение ИВЭ выбрано меньшим, чем напряжение сети за вычетом напряжения на дуге, с тем чтобы ИВЭ остался в рабочем режиме при появлении дуги;
- входная цепь ИВЭ содержит низкочастотный LC фильтр (L1, C3), ослабляющий пульсации входного тока ИВЭ на его рабочих частотах;
- блок управления ИВЭ содержит операционный усилитель U2, питающийся напряжением  $\pm 12\text{В}$  относительно отрицательного полюса сети, что сделало рациональным организацию питания схемы ИД относительно той же точки; при этом в качестве датчика тока был использован компьютерный элемент «ток-напряжение» (Н1);
- в схему управления силовым МДП транзистором введён непрерывный ограничитель емкостных токов входного фильтра ИВЭ на транзисторе Q2.

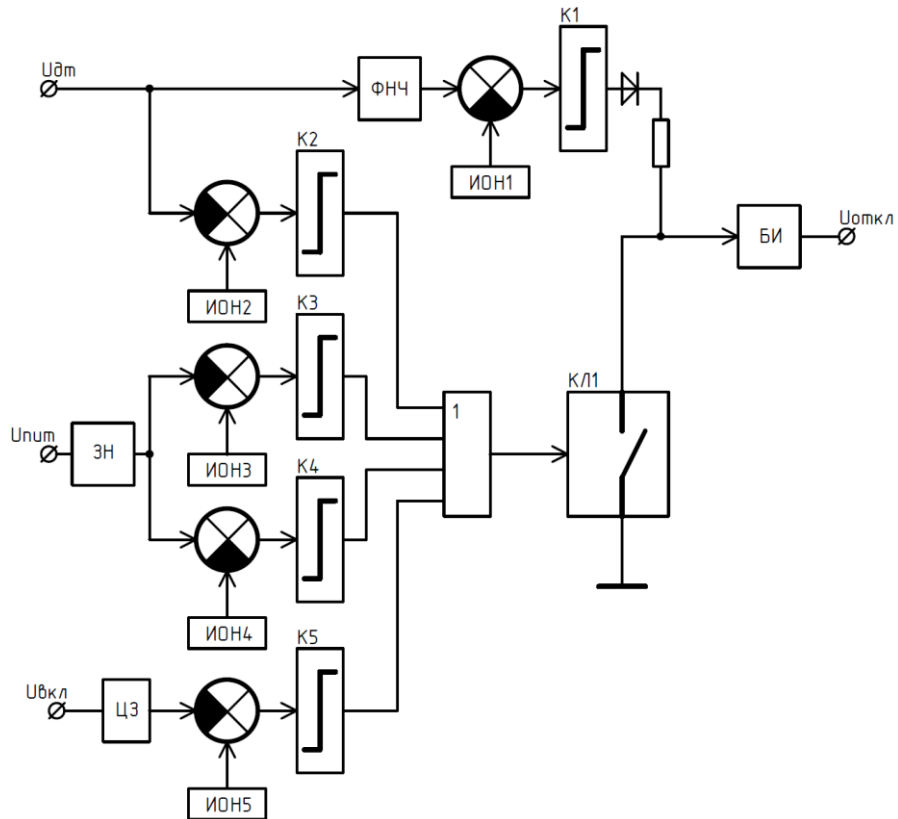


Рис. 5.21. Функциональная схема ИД для цепи с ИВЭ РЭА.

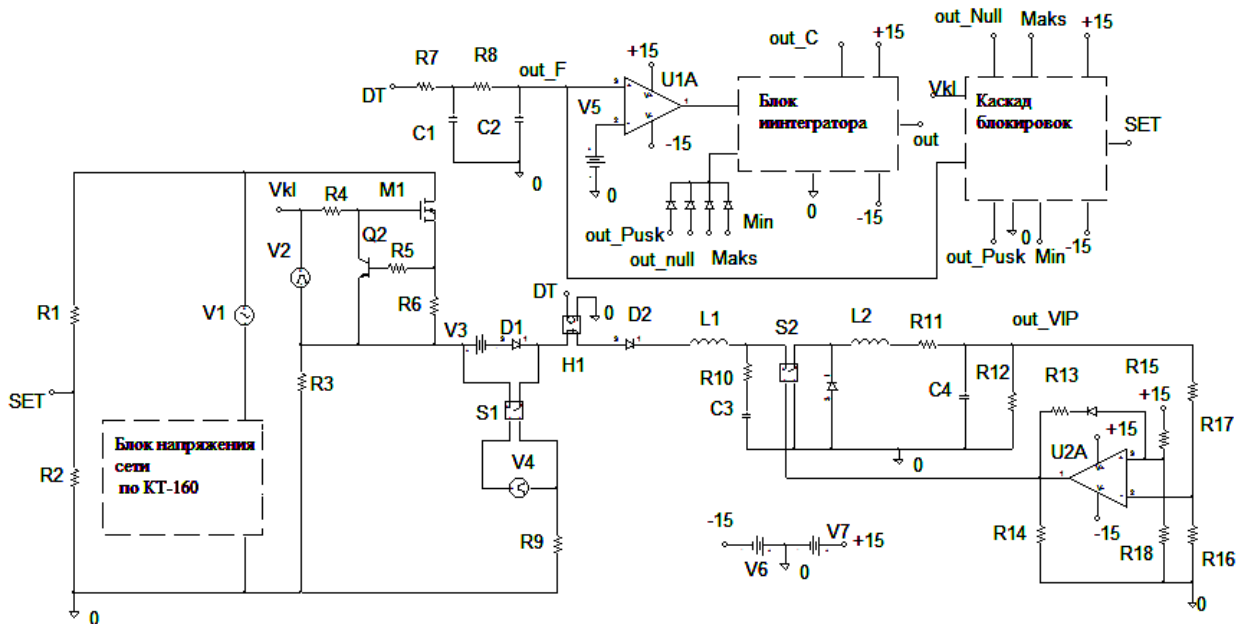


Рис. 5.22. Компьютерная модель ИД для цепей с ИВЭ РЭА

На рис. 5.23 приведены диаграммы процессов ликвидации спокойной дуги. Отмечается заметное увеличение пульсаций тока ИВЭ с ростом частоты сетевых помех.

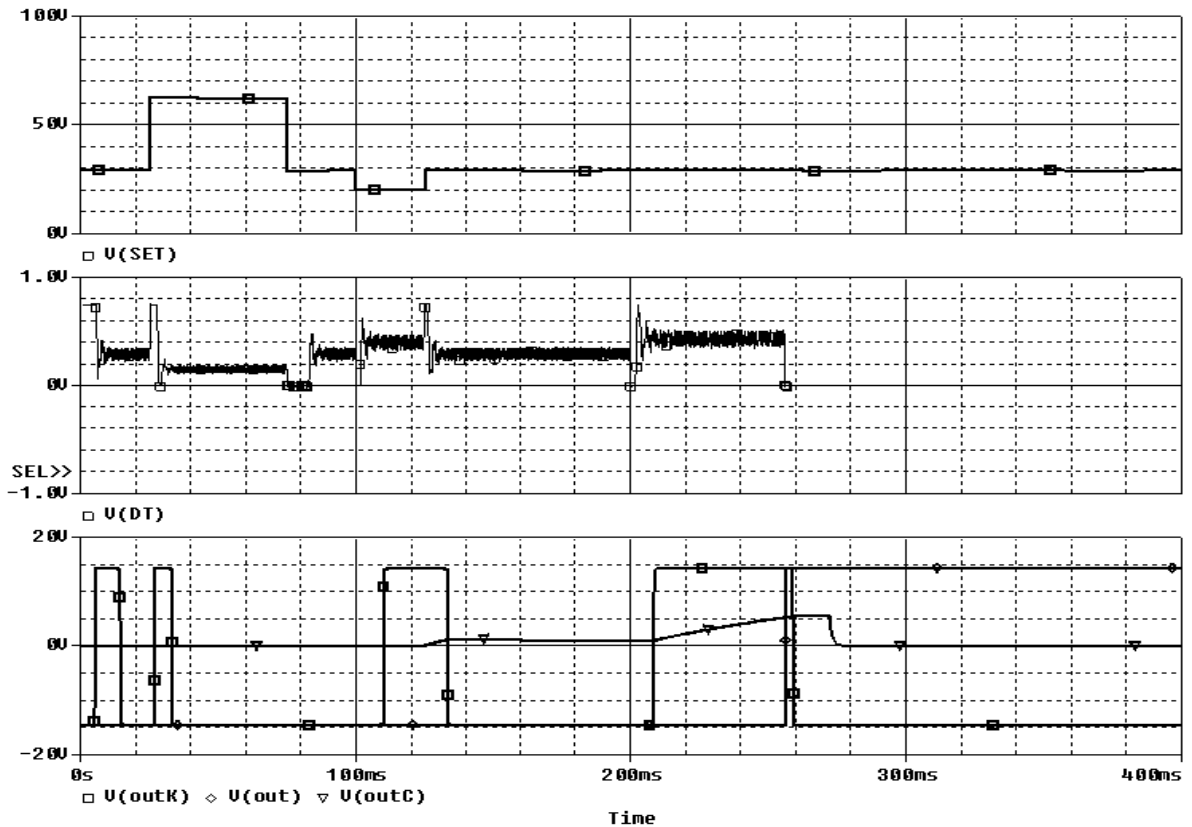


Рис.5.23 Процессы ликвидации спокойной дуги в схеме на рис. 5.22.

### 5.3.2. ИВЭ РЭА с дискретно изменяющейся выходной мощностью

Рассмотрим дополнительно особый случай управления ИВЭ с изменяющейся нагрузкой. Предположим, что ИВЭ может работать в одном из двух режимов: с выходными мощностями  $P1 > P2$ . Если исходному состоянию ИВЭ соответствует мощность  $P1$  и далее ток возрастает, то это – проявление дуги. Если же ток уменьшается, то это – признак изменения выходной мощности до уровня  $P2$ . При возрастании тока из этого состояния возможны варианты. В первом из них ток возрос не до исходного уровня и тогда – это признак дуги. Во втором варианте ток вернулся на исходный уровень. Тогда – это признак обратного переключения, либо признак дуги с напряжением на дуге, подчиняющийся условию:  $U_{д} = U_{инп} * (1 - P2/P1)$ .

Чтобы устранить неопределённость, воспользуемся новыми качествами транзисторной КЗА и выведем АЗК в активный режим стабилизации напряжения на нагрузке на уровне  $U_{д} < U_{к} < U_{инп}$ . Если ток в цепи подчинится условию:  $I_{н} = P1/U_{к}$ , то произошло обратное переключение. В противном



случае возникла дуга. Повторного случайного совпадения количественных значений токов аварийного и неаварийного режимов быть не может. Действительно пусть имеет место равенство токов  $P1/U_K = P2/(U_K - U_D)$ . Подставив ранее полученное условие  $P2 = P1 * (1 - U_D / U_{III})$ , после преобразований получим:  $U_K = U_{III}$ , что не соответствует условию контроля.

### 5.3.3. Импульсно-периодические нагрузки.

Рассмотрим возможные методы распознавания дуги в цепях с ИПН, учитывая их разнообразие. Из-за отсутствия полной информации о реальных ИПН в самолётных системах остановим внимание на трёх видах ИПН. Первый из них – ламповые нагрузки в режиме относительно редких проблесков. Второй – устройства накачки конденсаторов. Третий – вентиляторы на основе шаговых электродвигателей.

Характер изменения токов в первом варианте нагрузок имеет вид практически прямоугольных импульсов с нулевыми паузами, если принимать во внимание ток только через лампу или с ненулевыми паузами, если принимать во внимание ещё и ток, потребляемый несилевой частью коммутирующего устройства (рис. 5.24а). При возникновении дуги верхняя полка тока будет смещаться вниз по причине снижения напряжения на лампе, что может быть зафиксировано по «методу ВАХ», если иметь в виду характеристику  $I_{H.МАКС} = F(U_{II})$ . Практически схема индикации строится на основе компаратора, настроенного на уровень  $I_{КОМП}$  ниже верхней полки тока. В нормальном режиме с выхода компаратора снимается последовательность периодических импульсов. При возникновении дуги на выходе компаратора будет присутствовать только постоянное напряжение.

На рис. 5.24б приведена форма тока ИПН второго типа. В устройствах накачки конденсаторов как правило фиксируется верхний уровень тока, который не будет снижаться при возникновении дуги. Однако при этом будут возрастать время импульса, а также увеличиваться площадь под кривой тока и уменьшаться напряжение, измеренное в заранее выбранной

контрольной точке процесса. Любой из этих фактов можно положить в основу метода индикации дуги, если предварительно зафиксировать границы существования нормальных режимов.

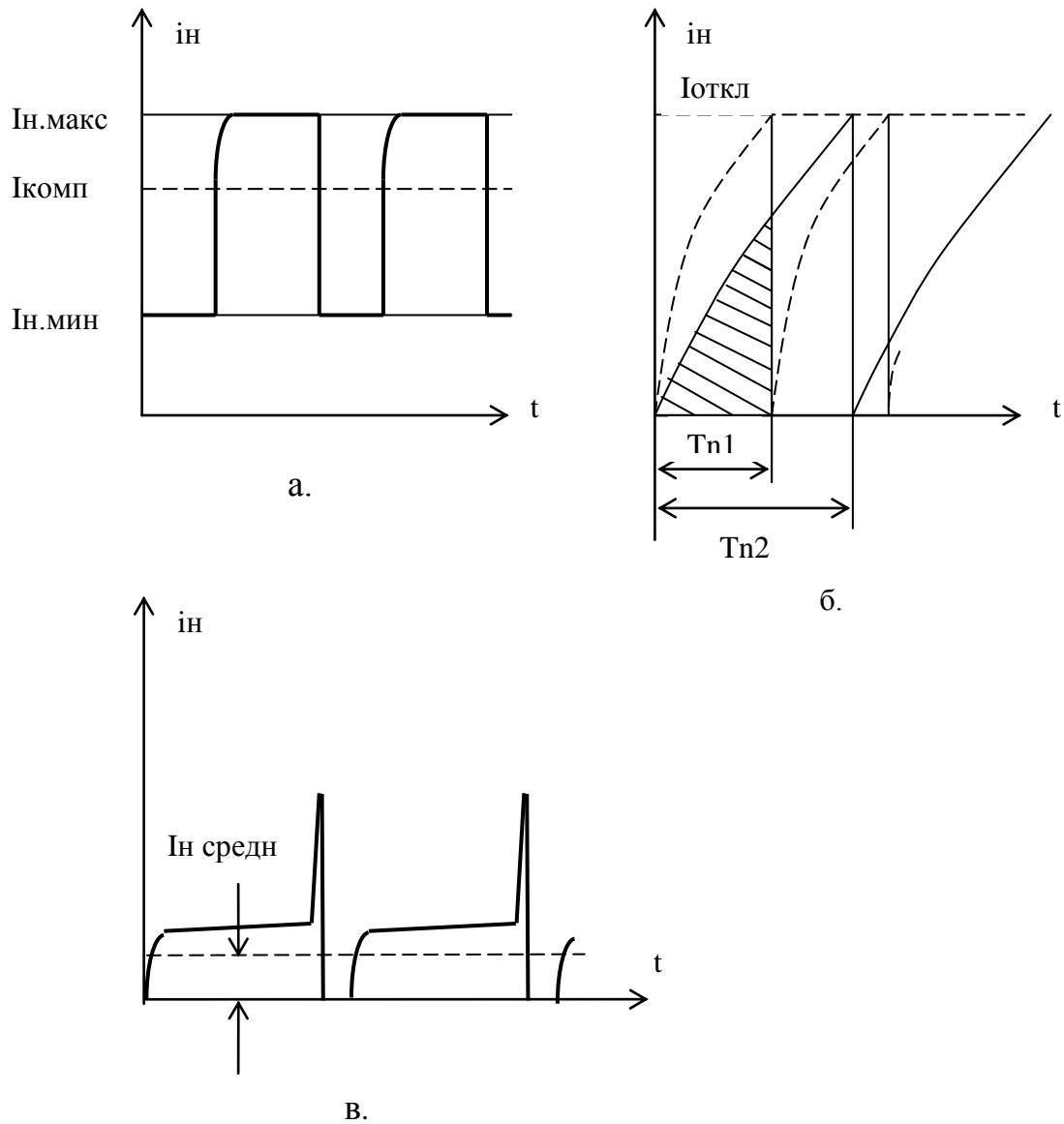
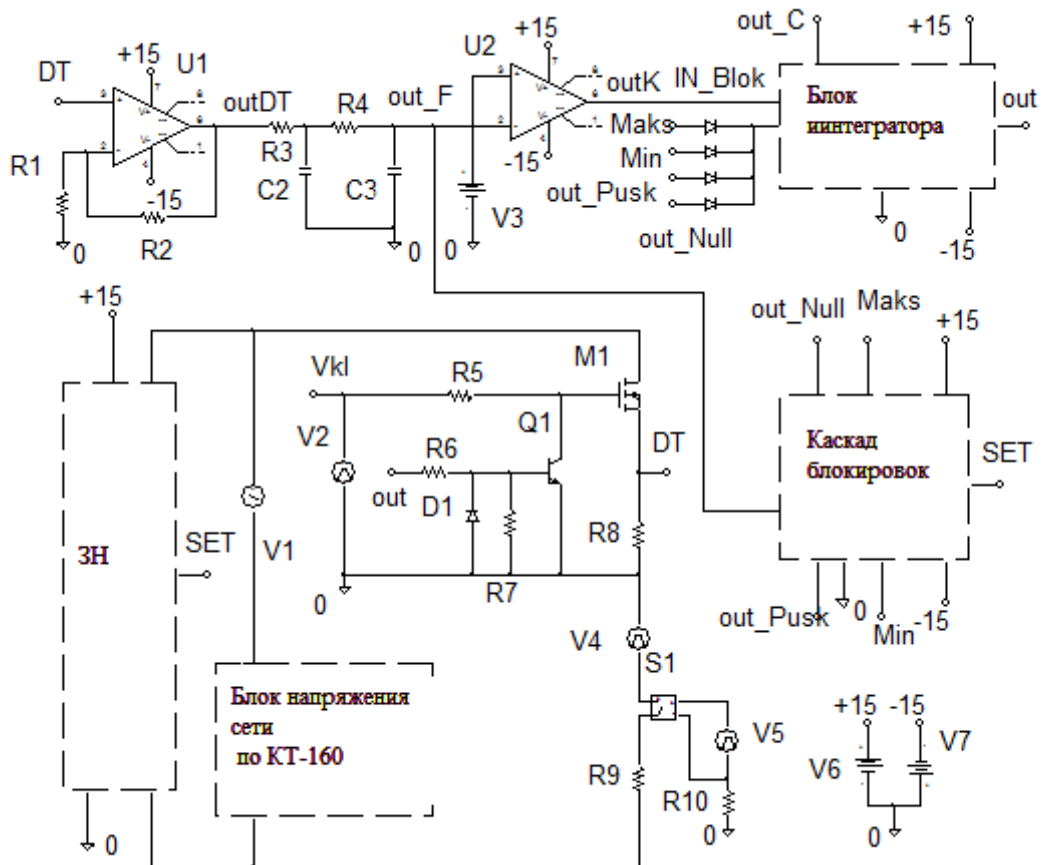


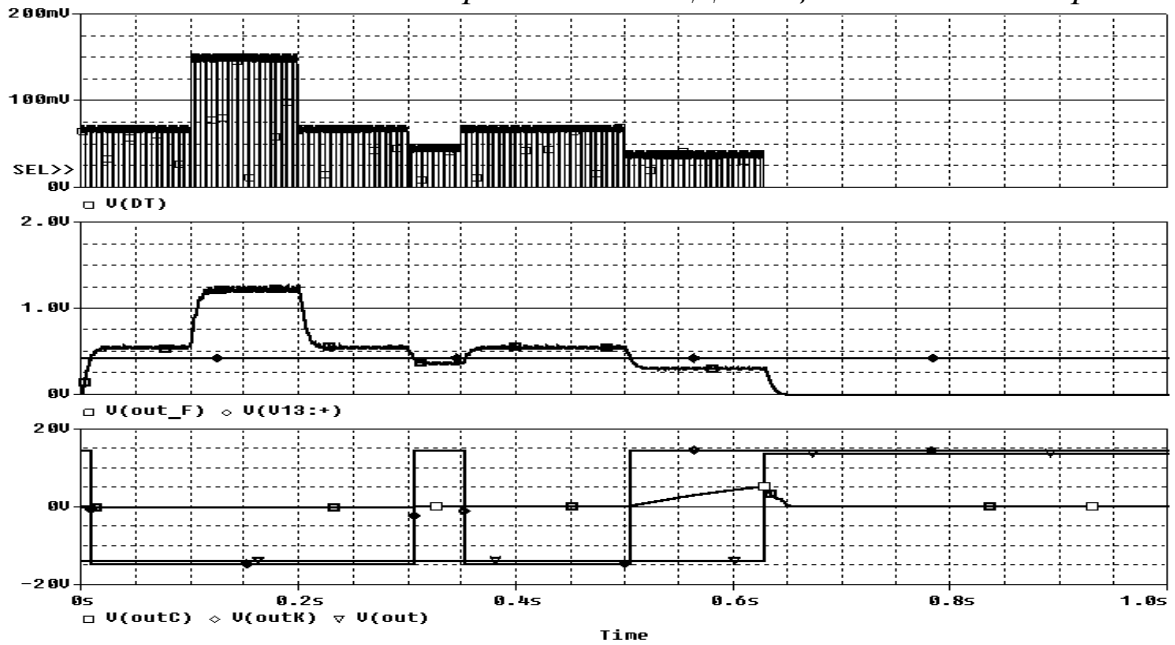
Рис. 5.24. Диаграммы изменения токов ИПН: лампы накаливания в проблесковом режиме (а), устройства накачки конденсатора (б), вентилятора на шаговом электродвигателе (в).

Ток, потребляемый электродвигателем вентилятора, выглядит как последовательность импульсов, по форма близких к прямоугольным и имеющим нулевые паузы (рис. 5.24в). Если ввести в цепь сигнала сглаживающий фильтр и выделить среднее значение тока, то далее схему индикации дуги можно строить по принципу контроля за уменьшением этого тока. Экспериментально установлена пропорциональная зависимость тока, потребляемого вентилятором от напряжения его питания. В таком случае

функциональная схема ИД для индикации дуги в цепи с вентилятором качественно не будет отличаться от схемы индикации дуги в цепи с резистивной нагрузкой (рис. 5.8). На рис. 5.25 приведена компьютерная модель схемы индикации. Цепь нагрузки представлена здесь как комбинация резистора R9, сопротивление которого рассчитано по амплитуде импульсов тока нагрузки, ключа S1 и источника импульсного напряжения V12 требуемой частоты и скважности. Прямой тракт схемы дополнен усилителем на микросхеме U1. На рис. 5.26 приведены временные диаграммы процессов в компьютерной модели схемы в режиме ликвидации спокойной дуги, подтверждающие работоспособность ИД. Верхняя диаграмма – напряжение с выхода датчика тока, средняя диаграмма – напряжение на выходе сглаживающего фильтра «out F», на нижней диаграмме – напряжения на выходе сравнивающего компаратора «out К», напряжение на конденсаторе интегратора «out\_C» и напряжение на выходе блока «out», отключающее АЗК.



*Рис. 5.25. Компьютерная модель ИД для цепи с вентилятором.*



*Рис. 5.26. Процессы ликвидации спокойной дуги в цепи с вентилятором.*

#### 5.3.4. Коллекторные электродвигатели постоянного тока

Для идентификации дуги в цепях КДПТ можно использовать методы, отслеживающие уменьшение среднего тока якоря при возникновении дуги, но только в тех случаях, когда этот ток зависит от напряжения на якоре. Это условие выполняется, если момент нагрузки на валу двигателя зависит от его оборотов (вентиляторный момент, момент вязкого трения). Тогда уменьшение напряжения на якоре при появлении дуги вызовет уменьшение оборотов и момента, что будет сопровождаться уменьшением тока. При постоянных моментах на валу (большое сопротивление многоступенчатого редуктора, шестерёночный насос) средний ток якоря, связанный с моментом, останется постоянным, несмотря на уменьшения напряжения на якоре, однако обороты двигателя уменьшатся. Этот косвенный признак появления дуги может быть использован для её индикации. Уменьшение оборотов сдвигает влево спектр пульсаций якорного тока и приводит к уменьшению числа импульсов, сформированных из пульсаций тока якоря на определённом интервале времени.

На рис. 5.27 приведена функциональная схема индикатора дуги в цепи с КДПТ. Напряжение с датчика тока проходит через фильтр верхних частот, избавляясь от постоянной составляющей, усиливается, выпрямляется и сравнивается с опорным уровнем, отсекающим помехи сети, на входе компаратора. Прямоугольные импульсы с выхода компаратора поступают на вход счётчика импульсов, запрограммированного на число импульсов в пределах выбранного интервала времени, меньшее, чем в нормальном режиме. Счётчик периодически обнуляется. В пусковом режиме электропривода и переходных режимах сети счётчик блокируется.

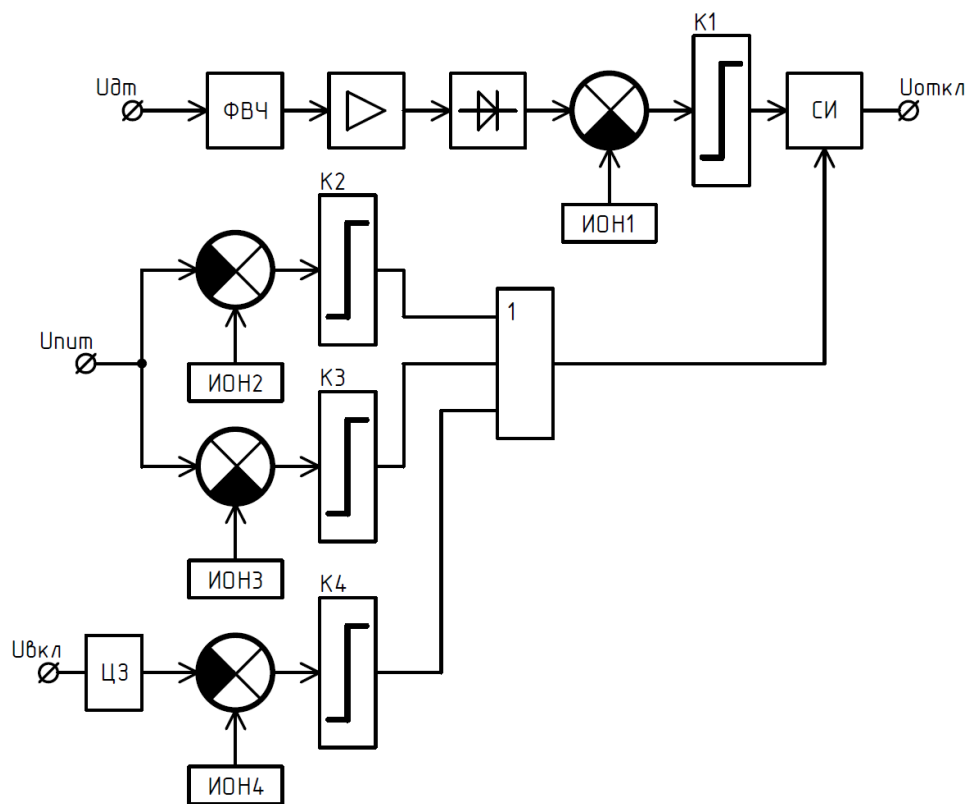


Рис. 5.27. Функциональная схема ИД для цепи с КДПТ.

На рис. 5.28...5.30 приведены осциллограммы, снятые с выхода формирователя импульсов в процессе испытания лабораторного макета схемы. На вход схемы индикации подавалось напряжение с датчика тока в цепи с КДПТ электромашиного инвертора типа ПАГ-1Ф. Осциллограмма на рис. 5.28 соответствует процессам в неповреждённой цепи. Осциллограммы на рис. 5.29 и рис. 5.30 – процессам в цепи с КДПТ в режиме с устойчивой голубой дугой и устойчивой жёлтой дугой. Число импульсов в интервале 100 мс составляет соответственно: 50, 18 и 30.

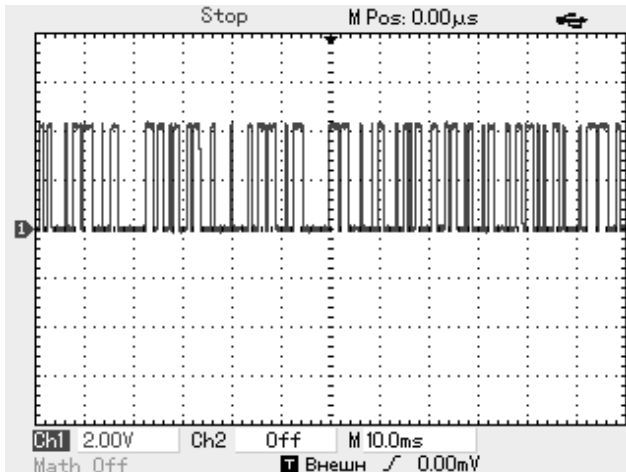


Рис. 5.28. Выходное напряжение схемы рис.5.27, сформированное из пульсаций тока КДПТ.

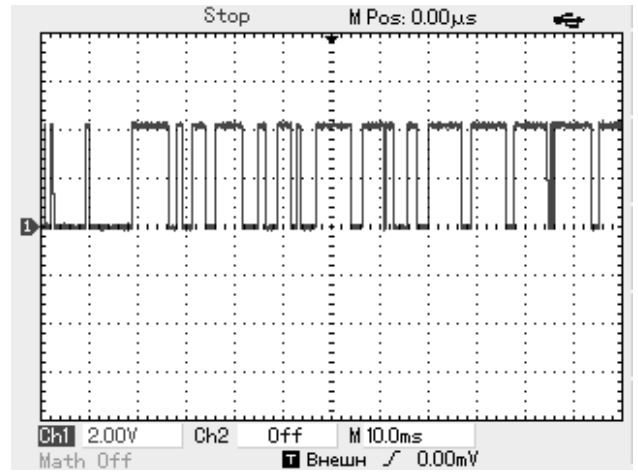


Рис. 5.29. Выходное напряжение схемы рис. 5.27, сформированное из пульсаций тока КДПТ при наличии голубой дуги в его цепи.

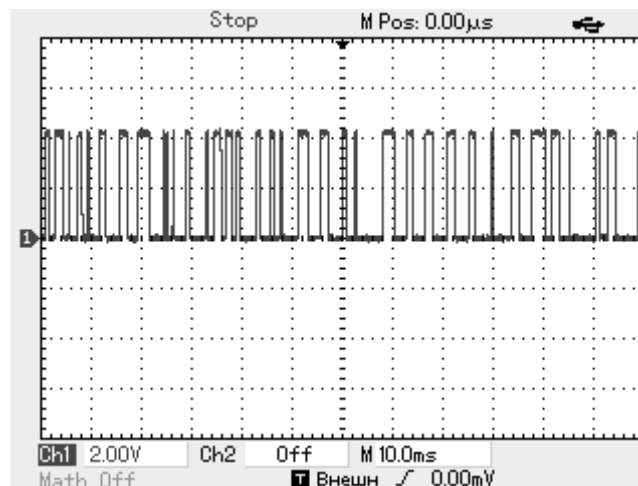


Рис. 5.30. Выходное напряжение схемы рис. 5.27, сформированное из пульсаций тока КДПТ при наличии желтой дуги в его цепи.

### 5.3.5 Индикация прерывистой последовательной дуги.

В ходе компьютерного моделирования большинства исследованных схем индикации устойчивой дуги в цепях с нагрузками различных типов установлен факт работоспособности этих схем при дуге прерывистого типа. Всё же в ряде случаев были отмечены некоторые нарушения запланированных алгоритмов. Это вынуждает организовать дополнительный, параллельный основному, канал индикации прерывистой дуги.

Исследованиями прерывистой дуги, результаты которых были изложены в главе 3, установлено наличие провалов тока в фидере с любой из

рассмотренных нагрузок до уровня, соответствующего горению дуги, либо до нуля. На рис. 5.31 приведена функциональная схема индикатора прерывистой дуги, содержащая компаратор с опорным уровнем напряжения, соответствующим  $0,7 \dots 0,75$  от номинального тока и счётчик импульсов, сформированных компаратором из тока дуги. В память счётчика заложено контрольное число импульсов ( $5 \dots 10$ ) на интервале  $1 \dots 2$  с. Счётчик периодически обнуляется. В пусковых режимах нагрузки и переходных режимах сети счётчик блокируется с выхода ячейки 3-ИЛИ.

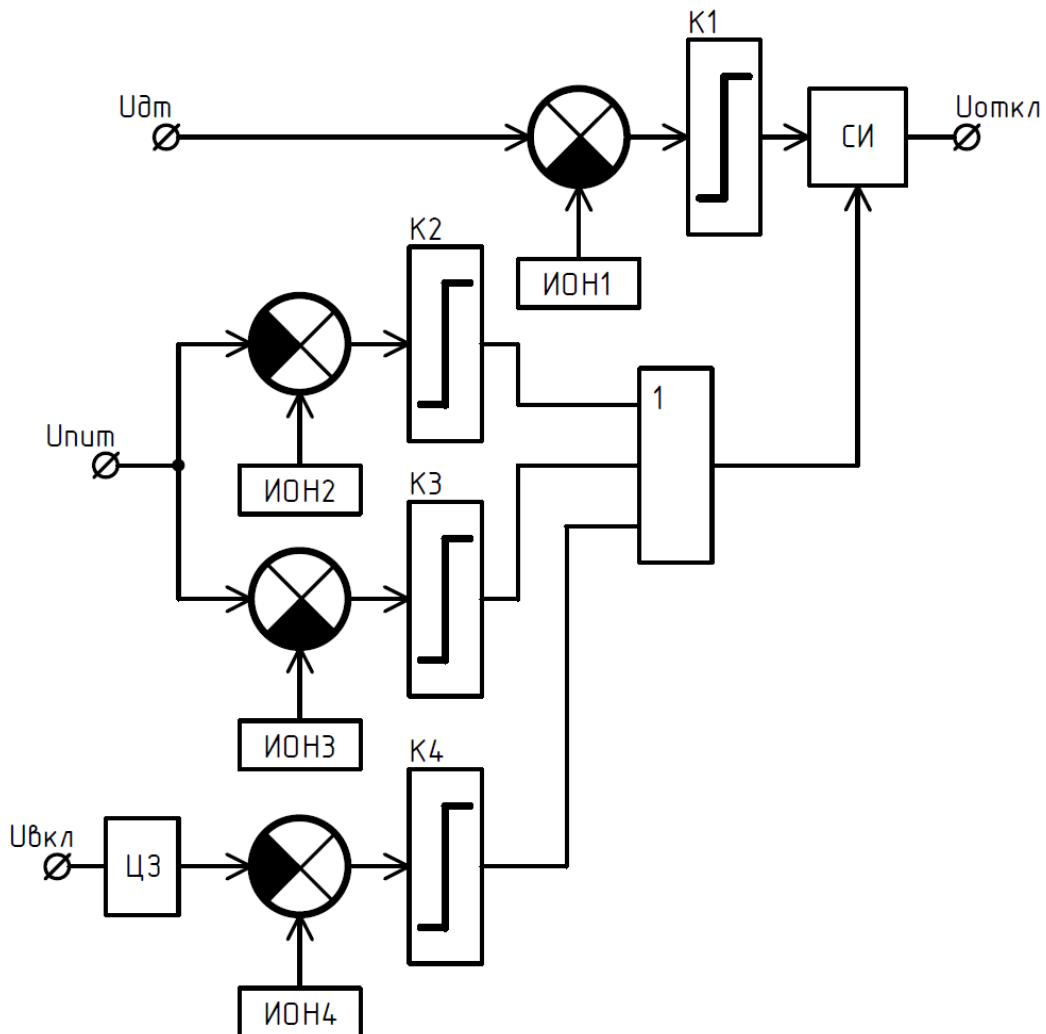


Рис. 5.31. Функциональная схема для индикации прерывистой дуги.

5.3.6 Устройство индикации последовательной дуги в цепях с заданными типовыми нагрузками.

На рис. 5.32 приведена функциональная схема аналогово-цифрового устройства, способного осуществить индикацию последовательной дуги в

заранее выбранной цепи с одной из типовых нагрузок авиационной сети постоянного тока. В её составе:

- индикатор прерывистой дуги на К1, СИ1 в виде самостоятельного канала;
- индикатор дуги в цепи с КДПТ, (имеющем постоянный момент на валу), на К2, СИ2, подключаемый по входу аналоговым ключом Кл1;
- индикатор изменения уровня среднего тока в цепи с любой из следующих нагрузок: нерегулируемой резистивной, вентиляторе, ИВЭ РЭА, КДПТ с изменяющимся моментом на валу; индикатор содержит общий ФНЧ и коммутируется по входу ключом Кл2;
- индикатор изменения текущего значения тока на интервале импульса в цепи с ШИМ резистивной нагрузкой, коммутируемый по входу ключом Кл3;
- устройство «выборки-хранения» для индикации дуги в цепи с индуктивно-активной нагрузкой, коммутируемое по входу ключом Кл4;
- блок интегратора, общий для индикаторов дуги в цепях нагрузок, выбираемых ключами 2...4;
- каскад блокировок, общий для всех каналов схемы.



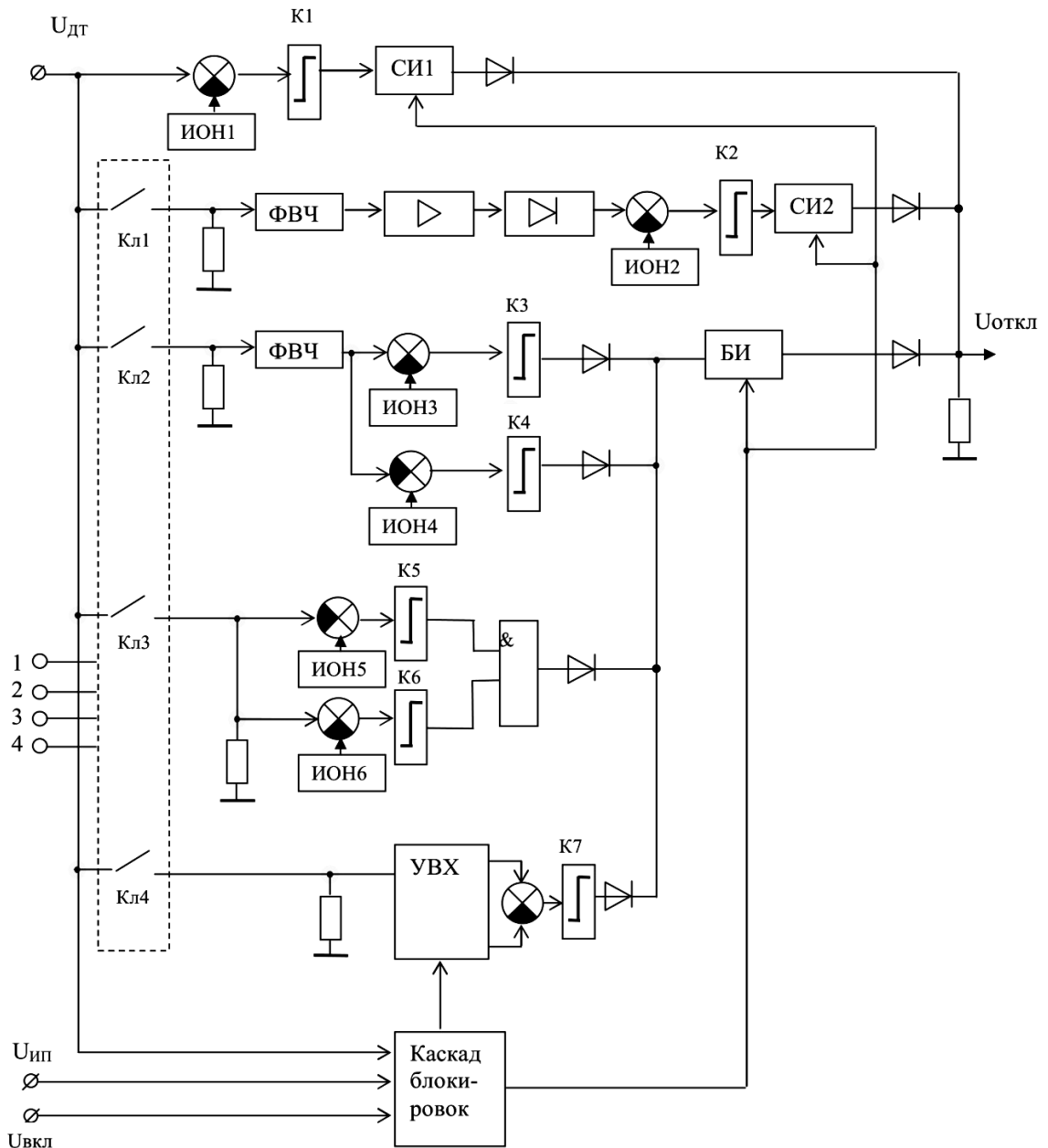


Рис. 5.32. Функциональная схема индикатора последовательной дуги в цепи с типовыми нагрузками авиационной сети постоянного тока.

Каналы устройства подключаются по входам подачи положительного напряжения от источника питания ИД на один из управляющих входов 1...4 микросхемы аналогового коммутатора (например, типа CD 4016В). Выходные цепи каналов прерывистой дуги, канала КДПТ и любого из остальных каналов соединены по схеме 3-ИЛИ.

#### 5.4 Аппаратурная реализация индикаторов последовательной дуги.

Для реализации схемы рис. 5.25 требуется 16 операционных усилителей, 12 источников опорного напряжения и электролитические

конденсаторы с общей ёмкостью до 5 мкФ при напряжении до 20 В. Приемлемые габариты схемы предполагают применение интегрально-гибридной технологии с бескорпусными компонентами, либо компонентами в малогабаритных корпусах поверхностного монтажа, при этом желательно использование аналоговых, либо аналогово-цифровых БМК.

На рынке радиоэлектронных изделий на 2015 г. имеются отечественные аналого-цифровые БМК для проектирования радиационно-стойких СБИС серии 5400 производства «Дизайн Центр «Союз» типа 5400КТ1Т и 5400БКУ2У.

Технология производства – КМОП КНИ (кремний на изоляторе) 0,24 мкм. Количество контактных площадок – 108 и 48 соответственно, а габариты 22x22 мм и 12,7x12,7 мм. Количество используемых выводов зависит от конструкции ИС, реализованной на основе АЦ БМК и определяется картой заказа. Диапазон температур – от -60 °С до +125 °С.

В составе БМК имеются: резисторы с суммарным сопротивлением 22000 кОм, неполярные конденсаторы суммарной емкостью 450 пФ, 28 быстродействующих операционных усилителя (ОУ), 29 ОУ общего применения, 56 компараторов, 25000 двухтранзисторных аналоговых ячеек, 130000 двухтранзисторных логических вентилях, 6 ЦАП, 6 регистров для АЦП.

Двухтранзисторный вентиль содержит 2 КМОП-пары с объединенными затворами, представляющие собой входы цифрового элемента.

Двухтранзисторные аналоговые ячейки (комплементарные транзисторы) объединены в группы, представляющие собой ряды транзисторов с одинаковыми геометрическими размерами и чередуются друг с другом и с наборами резисторов, конденсаторов и встроенных аналоговых функциональных блоков, что позволяет создавать сложные аналоговые узлы.

Таким образом, реализация индикатора дуги на аналого-цифровых БМК отечественного производства возможна, но при дополнении

электролитическими конденсаторами. Рассчитано, что площадь, занимаемая электролитическим конденсаторами и керамическими конденсаторами большого номинала, которые невозможно выполнить в составе БМК примерно вдвое увеличивают общую площадь схемы с учетом трассировки.

### **Выводы по главе 5.**

1. Разработаны функциональные схемы, аналоговые и аналого-цифровые компьютерные модели ИД последовательного типа, построенные по принципу контроля за средними значениями токов 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. Работоспособность ИД подтверждена моделированием и испытаниями лабораторных макетов.

2. 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.

3. 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. Любой из этих вариантов является дополнением к схемам управления транзисторных аппаратов защиты и коммутации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. В результате анализа по аварийным дуговым разрядам в СЭС выполнена их классификация по типу и параметрам СЭС, характеру исследований, физическим основам и конкретным методам индикации и ликвидации дуги.

2. 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.

3. 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.

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

5. 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.

6. 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.

7. 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.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

СЭС – система электроснабжения

ЛА – летательный аппарат

ИВЭП – источник вторичного электропитания

РЭА – радиоэлектронная аппаратура

ЭМС – электромагнитная совместимость

ЭДС – электродвижущая сила

УТЗ – узел токовой защиты

КЗ – короткое замыкание

ТУ – технические условия

ООС – отрицательная обратная связь

АЗК – автомат защиты и коммутации

КЗА – коммутационно-защитная аппаратура

ИД – индикатор дуги

СИ – счетчик импульсов

ОУ – операционный усилитель

МП – микропроцессор

ЦУН – центр управления нагрузкой

АС – переменный ток, англ. alternating current

DC – постоянный ток, англ. direct current

SSPC – автомат защиты и коммутации, англ. Solid state power controller

ВАХ – вольтамперная характеристика

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ИПН – импульсно-периодические нагрузки

ЦЗ – цепь задержки

СУ – система управления

АЭДР – аварийный электрический дуговой разряд

АД – аварийная дуга

ИВЭ – источник вторичного электропитания

КДПТ – коллекторный двигатель постоянного тока

ИП – источник питания

НЧ – низкие частоты

ВЧ – высокие частоты

ФНЧ – фильтр нижних частот

ФВЧ – фильтр высоких частот

БДПТ – бесколлекторный двигатель постоянного тока

БК – буферный каскад

ИОН – источник опорного напряжения

ЗН – зеркало напряжения

ЖМ – ждущий мультивибратор

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ДТ – датчик тока

СУЗ – система управления и защиты

БИ – блок индикации

УВХ – устройство выборки-хранения

ГВХ – генератор выборки-хранения

ЖМ – ждущий мультивибратор

БД – блок дифференцирования

БМК – базовый матричный кристалл

### Библиографический список.

1. H.Haberlik, M. Real. Lichtbogendetector (LBD) zur Ferndetection von gefarlichen Lichtbogen auf der DC-Seite von PV-Anlagen /22 Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 2007.
2. S.Philipp, R. Grab. Lichtbogenerkennung – Normuberblick und technische Anfofderungen. / [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de).
3. J.A. Wafer. The Evolution of the Arc Fault Circuit Interruption / 51<sup>st</sup> IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts.
4. F. Berger. Der Storlichtbogen – ein Uberblick / [www.tu-lumenau.de](http://www.tu-lumenau.de).
5. V. Nayebi, M.Gandomkar, M. J. Ramezani. New Method for High Impedance Faults Detection using Total Garmonic Destortium Properties and Time Variations of Current Waveform. / International Journal of Automation and Power Engineering, Voll, Issue-7, Oct. 2012, S. 165-173.
6. Shu-Chen Wang, Chi-Jue Wu, Yi-Jie Wang. An Effective Detection Method of Serial Arc Fault on Low Voltage power Circuits / ISBN: 978-1-61804-094-7.
7. P. Zeller A Simple Arc Model for the Simulation of the Clearing Time of Drawn Arcs with a Commercial Electronics Simulation Tool in Electrical Contacts / Proceedings of the 55<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on? 2009, pp. 67 – 74.
8. F.M. Uriarte, H.B. Estes, T.J. Hotz, A.L.Gattozzi, J.D. Herbst, A. Kwasinski, R.E. Hebner. Development of a Series Fault Model for DC Microgrids / IEEE: 978-1-4577-2159-5/12, 2011.
9. H.B. Estes, A. Kwasinski, R.E. Hebner, F.M. Uriarte, A.L.Gattozzi. Open Series Fault Comparison in AC&DC Micro-grid Architectures / [www.youtube.com/user/utcem/](http://www.youtube.com/user/utcem/)
10. J.K. Hastings, J.C. Zuercher, E. Hetzmanseder. Electrical Arcing and Material Ignition Levels / SAE Technical Paper Series, 2004-01-1565.
11. J.J. Shea. Conditions for Series Arcing Phenomena in PVC Wiring / [JohnJShea@Eaton.com](mailto:JohnJShea@Eaton.com)



12. S. Liao, R. Zhang, X. Li. Feature Extraction from Series Low-Voltage Arc Fault / Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 30<sup>th</sup> Nov., 2012, Vol.45, No2.
13. Y. Liu, et al. Study on characteristics and detection of DC arc fault in power electronics system / 2012 international Conference on, 2012, pp 1043 – 1046.
14. D. Nemir, A. Martinez, B. Diong. Arc Fault Management using Solid State Switching / SAE Technical Paper Series 2004-01-3197.
15. M. Kruger. Lichtbogenentstehung und Lichtbogendetektion im neuen 42 V Bordnetz für Kraftfahrzeuge / Fachbereich Informations und Elektrotechnik, 2003-2004.
16. A. Aurora, N. Medora, T. Livernois. Circuit Protection Devices & Arc Fault Detection Schemes for Electrical Automotive Systems / IEEE Symposium on Product Compliance Engineering, Austin, Texas, 20-22 October, 2008.
17. J.B. Beck, D.C. Nemir. Arc Fault Detection Through Model Reference Estimation / SAE International, 2006-01-3090.
18. M.T. Allen, C. Singer, F.J. Potter. Exploration of Arcing in 28VDC Electrical Systems / 9<sup>th</sup> Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conf.
19. Il-kwon Kim, Dae-won Park, Su-ycon Choi, Gyung-suk Kil. Detection and Analysis of Series Arc Discharge in Indoor Wiring Systems / Proc. The 7<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Power Systems, Beijing, China, Sept. 15-17, 2007.
20. I. Khan, M. Critchley. Arc Fault Detector / [www.esterline.com](http://www.esterline.com)
21. M. Naidu, T.J. Schoepf, S. Gopalakrishnan. Arc Fault Detection Schemes for an Automotive 42V Wire Harness / SAE Technical Paper Series, 2005-01-1742.
22. J. Brooks, G. Scott. Arc-Fault Circuit Interrupters for Aerospace Applications / 1999 society of Automotive Engineers.
23. T. E. Potter, M. Lavado. Arc Fault Circuit Interruption Requirements for Aircraft Applications / [www.arc-shield.com](http://www.arc-shield.com)

24. Arc Fault Detection System / [arcsafe@astronics.com](mailto:arcsafe@astronics.com)
25. J. Stephenson. Eliminating False Positives in the Detection and Location of sub 3ms Faults on AC/DC Lines / [info@livewiretest.com](mailto:info@livewiretest.com)
26. C. Kim. Detection and Location of Intermittent Faults by Monitoring Carrier Signal Channel Behavior of Electrical Interconnection System / [www.mwfr.com/charlesk.html](http://www.mwfr.com/charlesk.html)
27. P.K. Kuhn, C. Furse, P. Smith. Locating Hidden Hazards in Electrical Wiring / Aged Electrical Systems Research Application Symposium, October 18-19, 2006, Chicago.
28. Arc-Alert<sup>TM</sup> Circuit Interrupter Technology / Eaton Aerospace Group TF300-8G, Nov., 2010.
29. B.K. Mussmacher, W.L. Froeb. Controllers Guard Against Arc Faults / Power Electronics Technology, 2004.
30. J. Jonson, B. Pahl, C. Luebke, T. Pier, T. Miller, J. Strauch, S. Kurzmaul, W. Bower. Photovoltaic DC Arc Fault Detector Testing at Sandia National Laboratories.
31. R.A. Pappas, C. Singer, E. Taylor. Arc Fault Circuit Breacer Development and Implementation.
32. R. Pappas. 115 Vac Single-Phase Arc-Fault Circuit Breaker Flight Test/DOT/FAA/AR-05/28.
33. UL 1999. Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters, Underwriters Laboratories Inc., Feb. 26, 1999, pp.27-50.
34. M. D. Mishrikey. Detection of Arcs in Automative Electrical Systems.
35. M. Ohrstrom. Fast Fault Detection for Power Distribution Systems/Licentiate Thesis Royal Instityte of Technology Departament of Electrical Engineering, Stockholm, 2003.
36. M.A. Saleem. FFT and Wavelet Transform based artifical neural Networks Pattern Recognition Schemes for High Impedance Arc Faults/A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Engineering, 2004.

37. N.I. Elkalashy. Modeling and Detection of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks / <http://lib.tkk.fi/Diss/2007/isbn9789512290154/>

38. D. A. Lee, A.M. Trotta, W.H. King. New Technology for Preventing Residential Electrical Fires: Arc-Fault Circuit Interrupters (AFCI).

39. G. Gregory, A. Manche. Arc Detection with the AFCI / IAEI News, July/August 2000.

40. Машуков Е.В., Шевцов Д.А., Ульященко Г.М. Транзисторные аппараты защиты и коммутации для авиационных систем распределения электроэнергии – М.: Изд-во МАИ – ПРИНТ, 2009. – 188с.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолётов и вертолётот. Общие требования и нормы качества электроэнергии.

47. Квалификационные требования КТ-60Д. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний.

48. 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.

49. 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.39-47.