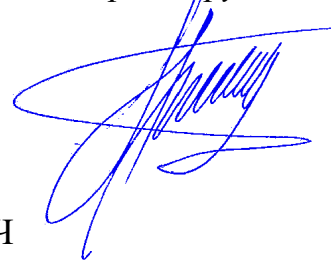


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи



ПРИТУЛКИН АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ

**СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНЫХ ДУГОВЫХ
РАЗРЯДОВ В АВИАЦИОННЫХ СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.03

«Электротехнические комплексы и системы»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор

Машуков Е.В.

Москва, 2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1 Анализ способов индикации и ликвидации дуговых разрядов в системах электроснабжения переменного тока	14
1.1 Объект исследования	14
1.2 Классификация результатов исследований	15
1.2.1 Физические основы индикации дуги	17
1.2.2 Тип применяемой силовой части	18
1.2.3 Характер размещения датчиков	22
1.3 Вывод	25
Глава 2 Исследование свойств параллельной дуги в авиационных системах электроснабжения переменного тока	28
2.1 Имитационное компьютерное моделирование процессов коммутации нагрузок транзисторным ключом	30
2.1.1 Коммутации нагрузок при номинальном токе	38
2.1.2 Коммутации нагрузок при переходном токе	42
2.1.3 Коммутации нагрузок при коротком замыкании	50
2.1.4 Коммутации нагрузок при перемежающемся коротком замыкании	51
2.2 Экспериментальное моделирование процессов коммутации нагрузок	54
2.3 Вывод	58
Глава 3 О свойствах последовательного аварийного дугового разряда в сетях переменного тока	60

3.1	Дуговой разряд, основные физические процессы, протекающие в дуге, тепловое и световое излучение.....	60
3.2	Процесс горения последовательного дугового разряда переменного тока	63
3.2.1	Зажигание дуги.....	64
3.2.2	Резистивная фаза горения дуги	66
3.2.3	Плазменная фаза горения дуги.....	67
3.2.4	Гашение дуги.....	74
3.3	Факторы, влияющие на горение последовательного дугового разряда переменного тока.....	75
3.3.1	Параметры электрической цепи	76
3.3.2	Параметры внешней среды	81
3.4	Энергетическое соотношение фаз горения	88
3.5	О способах идентификации последовательной дуги переменного тока.....	92
3.6	Вывод.....	96
Глава 4	Проектирование блоков распознавания и регистрации дугового разряда в авиационных сетях переменного тока	99
4.1	Моделирование последовательного дугового разряда.....	100
4.1.1	Структурные схемы и схемотехнические решения по реализации генераторов широкополосного хаотического шума.....	100
4.1.2	К вопросу о генераторах хаоса и псевдохаоса.....	110
4.1.3	Имитационная компьютерная модель устройств синтеза временных диаграмм тока и напряжения последовательной дуги	112
4.2	Структура и техническая реализация блоков обнаружения дуги.....	115

4.2.1	Распознавание дуги по наличию хаоса с помощью фазочастотного детектора.	116
4.2.2	Распознавание дуги по наличию хаоса с помощью амплитудного детектора	121
4.2.3	Распознавание дуги по наличию хаоса с помощью ШИМ-детектора.....	124
4.2.4	Распознавание дуги по наличию хаоса с помощью АЧ-детектора.....	127
4.2.5	Распознавание дуги по уровню производной тока.....	129
4.2.6	Распознавание дуги по частоте повторений производной тока.....	133
4.2.7	Распознавание дуги по наличию скачков тока	136
4.2.8	Распознавание дуги по действующему значению тока	139
4.3	Структура блока распознавания и индикации дугового разряда.....	142
4.4	Вывод.....	146
Глава 5	Универсальный автомат защиты и коммутации переменного тока с функцией защиты от аварийных дуговых разрядов	149
5.1	Конструктивное исполнение прототипа транзисторного АЗК	149
5.2	Результаты экспериментального исследования.....	155
5.3	Вывод.....	157
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	158
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	160
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Проблеме возникновения дугового разряда было уделено достаточно большое внимание начиная с конца XIX – начала XX веков. В основном, первоначальные исследования были направлены на изучение ее свойств с целью промышленного применения (например, в электросварке). Однако проблеме ликвидации дугового разряда долго время внимания не уделялось.

Первые исследования методов обнаружения и ликвидации дугового разряда были выполнены в интересах разработки контактной коммутационной аппаратуры в электросетях переменного и постоянного тока. К слову, данная проблема была решена исключительно конструктивными методами и до конца XX века этот вопрос был не актуален.

Начиная с середины 1990-х годов актуальность исследований по методам обнаружения и ликвидации дуговых разрядов резко возросла. Причиной тому послужили несколько крупных (по числу жертв) авиационных катастроф в коммерческой авиации: катастрофа рейса TWA 800 авиакомпании Trans World Airlines, которая произошла 17 июля 1996 года, катастрофа рейса SWR 111 авиакомпании «Swissair», произошедшая 2 сентября 1998 года. Причиной обеих катастроф стало возгорание электропроводки из-за образования аварийных дуговых разрядов. По данным Федерального управления гражданской авиации США за период с 1999 по 2004 год [100, стр. 87] и с 2004 по 2021 года в коммерческом секторе гражданской авиации США произошло 477 инцидентов связанных с задымлением, пожарами проводов питания или электроприборов, причиной которых мог стать аварийный дуговой разряд (таблица 1).

Таблица 1 Авиационные инциденты в США связанные с возникновением дугового разряда за период с 1999 по 2021 года.

	Анализ Eaton Corp.		Обзор FAA 1999-2004		Обзор FAA 1999-2021	
	Число	Процент	Число	Процент	Число	Процент
Поврежденный провод (натертый, порезанный, оборванный или закороченный)	84	30.4%	82	39.0%	195	41.0%
Плохой контакт в клеммном соединении (незакрепленное, проржавевшее, неисправный компонент)	22	8.0%	25	12.0%	67	14.0%
Электрообогрев иллюминатора	62	22.5%	32	15.0%	43	9.0%
Неисправность в освещении (отказ ламп или электромагнитного балласта в люминесцентных лампах)	12	4.3%	12	6.0%	15	3.0%
Плохой контакт в разъеме (загрязнение, неправильное положение контактов, повреждение)	11	4.0%	13	6.0%	24	5.0
Некорректный монтаж проводов (неграмотно подобран провод, некачественное соединение)	5	1.8%	---	---	---	---
Неисправность в нагрузке	38	13.8%	38	18.0%	100	21.0%
Неизвестная причина (сгоревший провод, причина не сообщается)	32	11.6%	8	4.0%	33	7.0%
Механическое повреждение	10	3.6%	---	---	---	---
Всего	276	100.0%	210	100.0%	477	100.0%
Инциденты с возникновением дуги	185	67.0%			330	69.0%

Помимо авиационной отрасли исследования проблем ликвидации аварийных дуговых разрядов также активизировались в космической области, промышленной (защита электросетей в жилых помещениях) и автомобильной отраслях (в рамках применения систем электроснабжения постоянного тока с повышенным напряжением 36...42 В), а также в рамках создания систем генерирования электроэнергии с первичными источниками питания в виде солнечных батарей.

Основные критические разработки были сделаны специалистами следующих институтов: National Taiwan University of Science and Technology (Тайвань), Helsinki University of Technology (Европа), Royal Institute of Technology (Европа), Sandia National Laboratories (США), University of Texas (США), The University of

Manchester (США). Практические разработки запатентованы сотрудниками Eaton Corporation (США), Leach International (Европа) UE Systems Incorporation (США).

Возникновение аварийного дугового разряда в авиационных электросетях является аварийным режимом работы системы электроснабжения (СЭС) летательных аппаратов (ЛА), так как приводит к:

- отклонению параметров электрического тока от номинальных значений,
- возникновению высокочастотных электромагнитных помех в электросетях,
- увеличению времени переходных процессов в системе электроснабжения,
- сокращению сроков службы контактных соединений,
- повышенный риск возгорания на борту ЛА, что может привести к авиационной катастрофе.

Особую опасность аварийным дуговым разрядам в авиационных электросетях придаёт тот факт, что они не могут быть обнаружены и устранены существующими аппаратами защиты и коммутации.

В отличие от промышленных электросетей, для которых к настоящему времени разработаны и серийно выпускаются устройства защиты и коммутации с функцией обнаружения и ликвидации аварийных дуговых разрядов, для авиационных электросетей разработка данных устройств не продвинулась дальше стадии создания прототипов, так как проблема обнаружения аварийного дугового разряда в авиационных системах электроснабжения оказалась существенно сложнее по ряду причин:

- 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.

На сегодняшний день самым распространенным способом реализации устройств защиты от дуговых разрядов является создание функциональных электронных блоков в качестве дополнения к существующей контактной и бесконтактной защитной аппаратуре. Наиболее исследованной областью являются авиационные электросети постоянного тока с напряжением 27 В, поскольку они обладают разветвленной структурой, обеспечивают электропитанием большое количество разнообразной электрической нагрузки, а разрабатываемые устройства для данной сети не имеют прямых промышленных аналогов.

Цели и задачи работы

Разработка методов обнаружения аварийных дуговых разрядов в авиационных сетях переменного тока; проектирование средств технической реализации данных методов в составе транзисторных аппаратов защиты и коммутации распределительных электросетей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ и классифицировать известные методы обнаружения и ликвидации аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых электросетях переменного тока; оценить их применимость в условиях авиационных систем переменного тока.

2. Разработать методы и технические средства индикации и ликвидации дуговых разрядов параллельного типа с использованием новых функциональных возможностей транзисторных автоматов защиты от токовых перегрузок.

3. Провести дополнительные теоретические и экспериментальные исследования дуговых разрядов последовательного типа в сетях переменного тока с учетом воздействия механических вибраций на электрические процессы в дуге.

4. Разработать набор альтернативных электронных схем с функциями обнаружения последовательного дугового разряда по его характерным внутренним и внешним признакам. Определить вариант индикатора, наиболее рациональный в условиях авиационных электросистем переменного тока.

Модифицировать существующие транзисторные аппараты защиты и коммутации переменного тока, расширив их возможности блоками индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов параллельного и последовательного типов.

Объем исследования

Устройства защиты электросетей от аварийных дуговых разрядов.

Предмет исследования

Принципы построения электронных устройств защиты электросетей от аварийных дуговых разрядов.

Область исследований

Авиационные электросети переменного тока с напряжением 115/200 В и частотой 400 Гц.

Научная новизна

1. Исследовано и разработано электронное устройство нового типа, предназначенное для обнаружения и ликвидации аварийных дуговых разрядов в авиационных сетях переменного тока, входящее в состав модернизированных транзисторных автоматов защиты от токовых перегрузок.

2. Предложены метод и средство его реализации для ликвидации аварийного дугового разряда параллельного типа, основанные на способности транзисторных аппаратов защиты к амплитудному ограничению выходных токов.

3. Исследованием последовательных дуговых разрядов в электросетях переменного тока пополнены сведения об их свойствах:

- установлено, что последовательные дуговые разряды могут протекать с хаотической сменой двух фаз: резистивной и плазменной;
- обнаружено, что резистивная фаза не содержит хаотического шума в токе и не имеет сплошного спектра, что затрудняет её обнаружение;
- обнаружено, что плазменная фаза горения дуги между медным и стальным электродом не содержит хаотического шума в токе, не имеет сплошного спектра, а временные диаграммы тока и напряжения аналогичны резистивной фазе;
- установлено, что упомянутые фазы могут быть соизмеримыми по величине энергии, выделяющейся в межэлектродном пространстве;
- установлено, что соотношение между энергиями двух фаз горения дуги зависит от типа нагрузки фидера;
- определено, что наличие вибрации электродов при любой из двух фаз, сигнал тока содержит хаотический шум и имеет сплошной спектр;
- обнаружено, что наличие индуктивности не предоставляет плазменной фазе горения дуги над резистивной.

4. Исследованы и разработаны вспомогательные электронные блоки, использование которых существенно сокращает трудоемкость экспериментальных работ с реальной дугой, а именно: имитационная компьютерная модель временных диаграмм тока и напряжения последовательной дуги и «генератор хаоса» в виде компьютерной модели электронной схемы с хаотическим изменением её выходных параметров.

5. Разработаны принципы построения, функциональные схемы, имитационные компьютерные модели и лабораторные макеты электронных блоков обнаружения последовательной дуги по факту хаотических изменений в пульсациях её тока.

Практическая полезность

1. Результаты анализа известных методов и средств технической реализации индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых электросетях переменного тока.

2. Описания портативных стендов, предназначенных для экспериментального исследования характерных признаков устойчивых и прерывистых дуговых разрядов.

3. Имитационные компьютерные модели устройств синтеза временных диаграмм тока и напряжения последовательной дуги переменного тока, а также «генераторов хаоса».

4. Имитационные компьютерные модели и лабораторные макеты блоков обнаружения последовательной дуги.

5. Имитационная компьютерная модель и лабораторный макет транзисторного аппарата защиты и коммутации переменного тока с функцией обнаружения и ликвидации параллельных и последовательных аварийных дуговых разрядов.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач используются общие положения теории электрических цепей, физическое моделирование аварийных дуговых разрядов,

имитационное компьютерное моделирование и лабораторное макетирование методов обнаружения и ликвидации дугового разряда.

Реализация результатов работы.

Материалы диссертационной работы были использованы в дипломном и курсовом проектировании кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы».

Достоверность.

Достоверность полученных научных результатов подтверждается имитационным компьютерным моделированием, с использованием лицензионных сертифицированных программ, а также результатами испытаний разработанных лабораторных макетов.

Апробация работы.

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

- 46-я международная конференция «гагаринские чтения – 2020»
(г. Москва, 2020 г.)
- 47-я международная конференция «гагаринские чтения – 2021»
(г. Москва, 2021 г.)

Публикации.

По результатам исследования опубликовано 6 научных работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемых источников и приложения. Основная часть работы изложена на 160

страницах, включающая в себя 90 иллюстрации и 6 таблиц. Список используемых источников включает 108 наименований. Общий объем работы 172 страниц.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты анализа известных методов и средств технической реализации индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых электросетях переменного тока.

2. Метод и техническое средство индикации и ликвидации аварийной дуги параллельного типа в авиационных электросетях переменного тока.

3. Результаты исследований аварийных дуговых разрядов последовательного типа в авиационных электросетях переменного тока.

4. Методы и технические средства ликвидации аварийных дуговых разрядов последовательного типа, основанные на индикации хаотических изменений параметров в пульсациях тока дуги.

5. Функциональная схема и компьютерная модель модифицированного транзисторного аппарата защиты переменного тока с функциями индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов параллельного и последовательного типов.

Глава 1 Анализ способов индикации и ликвидации дуговых разрядов в системах электроснабжения переменного тока

Способы индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов представлены в многочисленных патентах по автоматам защиты и коммутации с функцией индикации дугового разряда. Подавляющее большинство патентов применяют универсальные методы индикации дугового разряда, которые могут применяться как в составе контактных, так и в составе бесконтактных автоматов защиты и коммутации (АЗК). Авторство большей части патентов принадлежит сотрудникам из США, Канады и Европы. Далее рассматриваются патенты, в которых применяются основные методы индикации и ликвидации дугового разряда.

1.1 Объект исследования

Создание устройств индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в системах электроснабжения переменного тока началось в 90-х годах XX века с разработки и применения специальных автоматов в жилых и промышленных наземных комплексах. Началом активных исследовательских работ в этой области считается публикация отчета [108] национальной ассоциации противопожарной защиты США (National Fire Protection Association – NFPA), в котором отмечалось, что подавляющее число пожаров в жилых домах приходилось на неисправную электропроводку и электрооборудование. При этом искрение было источником огня примерно в 60% случаев.

Первые рабочие прототипы промышленного производства появились к 1997 году, в 1999 году NFPA потребовала обязательного применения данных устройств на линиях, питающих розетки в спальнях жилых помещений. В том же году в США был издан стандарт UL 1999 [68, стр.32], содержащий описания контрольных тестов, предназначенных для проверки устройств индикации и ликвидации

аварийных дуговых разрядов на корректность работы и отсутствия ложных сигналов срабатывания. К 2008 году сфера обязательного применения и функционал данных устройств расширились, при этом стоит отметить, что из-за доведения конструкции количество новых патентных заявок на промышленные устройства защиты от аварийных дуговых разрядов резко уменьшилось.

В дальнейшем были предприняты попытки применения устройств защиты от аварийных дуговых разрядов в других системах, в частности в авиационных сетях переменного тока с напряжением 115/200 В как переменной, так и постоянной частоты 400 Гц. Однако, наличие в непосредственной близости большого количества систем, являющихся источником электромагнитных помех, применение коллекторных двигателей в приводах и невозможность стандартизовать применяемые потребители, а также широкие регламентированные диапазоны изменения напряжения и тока при переходном режиме работы вызвали ряд трудностей при внедрении данных устройств в авиационные СЭС. Стало очевидно, что ни одно из разработанных решений по индикации дугового разряда в промышленных сетях полностью не избавляло от возникновения ложных срабатываний. В связи с этим продолжается поиск и разработка действенных методов защиты от аварийных дуговых разрядов.

1.2 Классификация результатов исследований

Основная информация по структуре устройств защиты от аварийных дуговых разрядов, конструкции, методам индикации дуги, результатам их применения содержится в обзорах, научно-технических статьях, патентной литературе и технических отчетах. В результате проведенного анализа опубликованных работ предлагается следующая классификация устройств индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядом для авиационных сетей переменного тока, по нескольким основным критериям.

По физическим основам:

- оптические
- электромагнитные
- электрические

По типу применяемой силовой части:

- в виде дополнительного модуля в составе механических автоматов защиты и коммутации,
- в составе твердотельных автоматов защиты и коммутации, использующих полупроводниковые силовые приборы.

По типу применяемой электроники:

- с применением аналоговых приборов,
- с применением микроконтроллера,
- комбинированные.

По характеру размещения датчиков:

- в составе устройства,
- распределенные по системе электроснабжения.

По виду дуговых разрядов:

- для индикации параллельных дуговых разрядов,
- для индикации последовательных дуговых разрядов,
- универсальные.

По характеру изменений в СЭС, вносимых устройствами защиты от аварийных дуговых разрядов:

- с коренным изменением структуры СЭС,
- с частичным изменением структуры СЭС,
- без существенных изменений.

По месту размещения в СЭС:

- децентрализованные, в составе отдельных автоматов защиты от токовых перегрузок,

— централизованные, в составе центров управления электрическими нагрузками.

Проанализируем приведенную выше классификацию более детально с приведением ссылок на источники технической информации.

1.2.1 Физические основы индикации дуги

Применение оптического принципа индикации дугового разряда описано в патентах [5, стр.1] и [12, стр.1]. В них представлены устройства, снабженные светочувствительными датчиками обнаружения дугового разряда, которые могут определить наличие дуги по ее световой вспышке. Устройство, описанное в патенте [5, стр.1], помимо светочувствительного сенсора имеет дополнительный датчик, который сигнализирует о замыкании или размыкании контактной аппаратуры, находящейся в том же распределительном устройстве.

В патенте [6, стр.1] описано устройство с адаптивной системой индикации электродуговых коротких замыканий на основе контроллера. Он позволяет обнаружить дуговой разряд по световой вспышке в присутствии других источников света. В этом изобретении использованы датчики света, измеряющие интенсивность света, который присутствует в системе, и сравнивающие полученные величины с фиксированным пороговым значением, для определения наличия дугового короткого замыкания. Система индикации дуги, построенная на основе микроконтроллера, не только запоминает характер светового импульса при истинных и ложных срабатываниях, но и на основе полученных данных подстраивает алгоритм индикации дугового разряда. Кроме того, система позволяет проверять работу адаптивно настроенных алгоритмов индикации дуги, путем генерирования дополнительных световых импульсов с заранее известными сигнатурами, характерными для нормальной работы системы.

Описанные способы обладают рядом преимуществ: дешевое средство индикации дугового разряда, наличие дополнительного датчика срабатывания

контактной аппаратуры, который позволяет избежать ложного срабатывания устройства, применение микроконтроллера, при помощи которого можно проверить корректность работы выбранного алгоритма индикации дуги. Однако, данные методы позволяют регистрировать дуговой разряд исключительно в пределах распределительного устройства, поэтому их применение в авиационных сетях нецелесообразно, поскольку в последних из-за наличия вибрации велика вероятность возникновения дуги в кабельной части системы распределения электроэнергии.

Наибольшее количество патентов по устройствам защиты от аварийных дуговых разрядов предлагают использование электрических и электромагнитных способов защиты от дугового разряда, поскольку использование данных способов индикации дуги позволяет более гибко применять эти устройства в составе систем электроснабжения. Кроме того, размещение оптических датчиков вне распределительных устройств не представляется возможным ввиду плотной компоновки проводов на борту ЛА, труднодоступного подхода и необходимости в большом количестве сигнальных проводов от датчиков.

1.2.2 Тип применяемой силовой части

В авторском свидетельстве [3, стр.1] описано изобретение, предусматривающее применение схемы индикации и ликвидации аварийного дугового разряда в качестве дополнительного модуля к механическому автомату защиты и коммутации. В отличие от классического автомата защиты и коммутации указанный образец подключается не только к линии питания, но и к нейтральной линии. Силовые линии представлены в прототипе в виде жесткого проводника, окруженного и удерживаемого гибким проводником. Оба проводника проходят через трансформатор тока, который является датчиком для модуля индикации дугового разряда. Помимо трансформатора тока модуль снабжен датчиком напряжения, который измеряет падение напряжения на жестком проводнике.

Представленный миниатюрный автоматический выключатель является наиболее дешевым вариантом создания автомата защиты с функцией гашения дуги, отличается простотой конструкции и как следствие высокой надежностью. Однако использование нейтрального провода для диагностики дугообразования приводит к кардинальной перестройке всей авиационной системы электроснабжения, в которой традиционно в качестве нейтрального провода используется металлический каркас ЛА.

В другом патенте [11, стр.1] описано устройство датчика неисправности проводки с функцией защиты от дуговых замыканий, который предусматривает прокладку дополнительного силового провода параллельно существующему проводнику. Этот способ позволяет проводить оценку целостности фидера от источника до места размещения датчика, без необходимости прокладки нейтрального провода. Проложенный дополнительный проводник позволяет измерять и проверять падение напряжения на силовом проводнике, чтобы оно было небольшим и / или не имело дополнительного высокочастотного шума. В другом варианте реализации дополнительный проводник является резервным силовым проводником, соединенным параллельно с основным силовым проводником, что позволяет измерить величину протекающего тока как в основном, так и в дополнительном силовом проводе.

Применение дополнительного силового провода не приводит к кардинальной перестройке авиационной системы электроснабжения, однако ведет к увеличению веса и объема кабельной сети, что в сумме с жестким лимитом на массу и ограниченной площадью отверстий в силовом каркасе, делает невозможным реализацию данных способов на борту ЛА. Кроме того, из-за постоянного увеличения потребляемой мощности в системе электроснабжения, намечается тенденция к повышению номинального напряжения в сети, следовательно, при применении контактной защитной аппаратуры резко повышается вероятность возникновения последовательной дуги между контактами. Таким образом, в

большинстве патентов на устройства защиты от аварийных дуговых разрядов предполагается их применение в составе бесконтактной аппаратуры защиты и коммутации.

Полупроводниковый прерыватель цепи переменного тока, который описан в патенте [9, стр.1], обеспечивает питанием цепь нагрузки с определенным уровнем напряжения и тока, управляет мощностью при обнаружении короткого замыкания на землю, а также при обнаружении параллельных и последовательных дуговых разрядов в цепи нагрузки. В состав прерывателя входит силовой полупроводниковый ключ, построенный на транзисторах типа металл-оксид-полупроводник (МОП-транзисторах), а также микроконтроллер, подпрограммы которого обнаруживают дуговой разряд по аномалиям в форме волны напряжения и в формах тока в течении нескольких периодов.

Похожее устройство также описано в авторском свидетельстве [1, стр.1], однако, в отличие от устройства, описанного в патенте [9, стр.1], оно снабжено двумя отдельными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), которые преобразуют сигналы из непрерывных аналоговых сигналов в дискретные цифровые данные. Один АЦП обнаруживает наличие последовательного дугового замыкания, а другой – короткое замыкание на землю и/или дуговое замыкание на нейтральный провод. Каждый АЦП работает независимо от другого и может быть доступен для микроконтроллера по мере необходимости, не мешая работе другого АЦП. Данная схема позволяет сконфигурировать модуль так, чтобы он мог использовать свой датчик с различной частотой дискретизации в зависимости от потребностей соответствующих алгоритмов обнаружения. Таким образом освобождаются внутренние ресурсы главного процессора для других операций и действий, связанных с обнаружением неисправностей модулей, отслеживанием времени и/или для управления периферийными устройствами по мере необходимости.

Патент [13, стр.1] описывает трехфазный автоматический прерыватель с функцией ликвидации дугового разряда. По своей структуре он похож на устройство, описанное в авторском свидетельстве [1, стр.1], то есть имеет микроконтроллер и отдельный модуль обнаружения дуги, но имеются и различия в виде присутствия трех микроконтроллеров: по одному на каждую фазу. Индикация дуги происходит за счет обнаружения внезапного роста переменного тока при синхронном падении напряжения, а также наличие значительного количества высокочастотного шума.

Данные устройства могут быть использованы в авиационных сетях переменного тока, однако применение микроконтроллера снижает их помехозащищенность. Алгоритмы обнаружения дуги могут дать ложные срабатывания при внешних электромагнитных помехах, работе коммутационной аппаратуры в составе СЭС или при переходном режиме работы СЭС. Кроме того, в патентах не раскрыты все алгоритмы подпрограмм процессоров и модулей АЦП, параметры индикации дугового разряда, что требует проведения дополнительных исследований по методам индикации дуги.

В отличие от предыдущих изобретений, в авторском свидетельстве [2, стр.1] описывается автоматический прерыватель цепи в миниатюрном исполнении с функцией прерывания дугового разряда, который помимо использования схожих алгоритмов обнаружения дугового разряда, применяет заранее заложенные в микропроцессор характеристические профили различных нагрузок, чтобы уменьшить количество ложных срабатываний в автоматическом выключателе. Устройство может быть использовано в составе авиационных систем электроснабжения, но вопрос о его помехозащищенности (из-за наличия микроконтроллера) остается открытым. Данное устройство обладает лучшей защитой от ложных срабатываний, по сравнению с устройствами, представленными в патентах [9, стр.1], [1, стр.1] и [13, стр.1], однако наличие большого количества нетипичных нагрузок и постоянно меняющийся их состав затрудняет применение

данного устройства в составе ЛА. Также в патенте не раскрыт состав оборудования, алгоритмы подпрограмм обнаружения дуги в микроконтроллере, а также таблицы с профилями нагрузок, что требует проведения дополнительных исследований.

В патенте [7, стр.1] описывается устройство обнаружения дугового разряда с функцией защиты от ложного срабатывания. Это устройство обладает внутренней памятью, записывающей параметры тока и напряжения при срабатывании АЗК. Данный подход при планируемых сроках эксплуатации в районе десятков лет и столкновении с ранее непредвиденными нагрузками позволяет уменьшить вероятность ложного срабатывания, по сравнению с другими устройствами. Устройство запоминает характеристики напряжения и тока при возникновении сигнала о дуговом разряде, сохраняет их во внутреннюю память. При последующем срабатывании датчиков дугового разряда и совпадении характеристик тока и напряжения за короткий промежуток времени устройство проигнорирует это событие, поскольку поведение тока и напряжения при дуговом разряде носит хаотичный характер, а возникновение одинаковых моделей поведения тока и напряжения за короткий промежуток времени крайне маловероятно и сигнализирует скорее о переходных процессах внутри нагрузки. Указанный способ лучше адаптирован к применению с нестандартными и постоянно меняющимися нагрузками, тем не менее среди минусов следует отметить, что данные предыдущих срабатываний в том числе истинных затираются последующими событиями. Не раскрыто устройство и тип датчиков дугового разряда, алгоритмов идентификации дуги, программный код работы микроконтроллера. Представленные в патенте материалы не позволяют проанализировать логику работы автомата защиты и повторить его конструкцию без применения данной ИМС с вшитой программой.

1.2.3 Характер размещения датчиков

Перечисленные выше патенты предполагают применение одного или нескольких датчиков, размещенных в корпусе устройства. Этот подход позволяет

отказаться от прокладки дополнительных сигнальных проводов от датчиков к вычислительным центрам, но требуют больших затрат на создание алгоритмов с уменьшенной вероятностью ложных срабатываний, на применение в составе АЗК микроконтроллеров, а также не позволяет определить точное место возникновения дугового разряда. Существуют патенты, которые предлагают применение нескольких датчиков, распределенных по системе электроснабжения. Данный подход позволяет упростить алгоритм индикации дугового разряда, снизить вероятность ложных срабатываний, обеспечивает инвариантность к характеру нагрузок и определяет участок на котором произошел дуговой разряд.

В патенте [10, стр.1] описано изобретение, которое относится к защите электрических цепей и, в частности, к обнаружению дуговых разрядов в отдельных зонах электрических цепей. В патенте описаны различные варианты подключения торообразного трансформатора к системе электроснабжения, позволяющие регистрировать дифференциальные токи, токи утечки, дифференциальные напряжения. Все это обеспечивает обнаружение как последовательных, так и параллельных дуговых разрядов в каждой защитной зоне системы электроснабжения, независимо от характера формы волны дугового замыкания или направления тока нагрузки в цепи, а также все виды межфазного замыкания. Применение этих датчиков сводится к их установке в различных местах системы распределения электроэнергии, возле источников питания и нагрузок, и сравнения их показаний. Указанный метод при небольших затратах обеспечивает удовлетворительную погрешность при обнаружении дуг; обнаружение дуг по нескольким признакам; не требует специальных устройств для хранения модели поведения нагрузки, но при этом обязательно наличие нейтрального провода, что, как уже описывалось ранее, недопустимо для авиационных сетей.

В патенте [8, стр.1] описано устройство обнаружения отказов с помощью распределенной сети датчиков. Представляемые способы и системы используют невероятную схему обнаружения дугового пробоя, которая измеряет состояния

(например, напряжение или ток), с использованием датчиков, в нескольких местоположениях в цепи, например, ответвленной цепи, для обнаружения наличия состояния дугового пробоя. В представленных способах и системах, измеренные состояния в начальной точке ответвления и каждом оконечном устройстве передаются обратно в централизованную систему обработки данных, например, контроллер, по проводному, беспроводному каналу связи или каналу связи по линии питания. Контроллер может определять наличие состояния дугового пробоя, если таковое вообще имеет место, по оценке измеренного состояния со стороны питания в начальной точке ответвления и со стороны нагрузки в каждом оконечном устройстве. Система требует наличие дополнительных проводов или беспроводных линий связи для связи контроллера с несколькими датчиками, распределенными по всей системе электроснабжения, где каждая ветвь с нагрузкой содержит датчик на стороне нагрузки, интерфейс связи, контроллер связи, датчик со стороны источника, интерфейс связи, контроллера приема данных от каждой ветви и сравнения полученных данных.

В авторском свидетельстве [4, стр.1] дано описание силового распределительного устройства переменного тока, в состав которого входят один или несколько аппаратов защиты и коммутации с функцией гашения дуги. Особенностью конструкции является наличие высокочастотного и низкочастотного спектральных датчиков, которые анализируют широкополосный шум и таким образом определяют наличие дуги. При этом, высокочастотный спектральный датчик является общим датчиком для всех автоматов защиты и сигнализирует о возможном возникновении дугового разряда, в то время как низкочастотные датчики находятся в каждом автомате защиты и определяют участок, где произошло дугообразование. Такая конструкция объясняется тем, что высокочастотные спектры, генерируемые дуговым разрядом, могут распространяться по всей системе электроснабжения и регистрироваться одновременно в нескольких ветвях, в то время как низкочастотные спектры не

могут распространяться на другие ветви. Описанное решение достаточно экономично, так как использует один высокочастотный датчик на все распределительное устройство, кроме того, оно существенно повышает помехозащищенность системы по сравнению с автоматами защиты, оснащенными датчиками с одним частотным спектром. Однако спектральные датчики регистрируют не только образование дугового разряда, но и различные электромагнитные помехи, наводимые от сторонних систем, а также различные переходные процессы в системе электроснабжения. Поэтому данный способ индикации дугового разряда не может быть применен для авиационных сетей переменного тока.

1.3 Вывод

1. В результате анализа публикаций, посвященных методам индикации аварийных дуговых разрядов в электросетях, была выполнена их классификация по физическим принципам, способам включения в состав АЗК, типу применяемой электроники, характеру и месту размещения датчиков.

2. Установлено, что наибольшее число публикаций посвящено методам индикации и реализованным на их базе автоматам защиты сети для промышленных и бытовых электросетей переменного тока, что объясняется их широкой распространенностью. Помимо переменного тока существует ряд исследований, направленных на создание автоматов защиты и коммутации постоянного тока для применения в области перспективных автомобильных, авиационных СЭС, а также в первичных СЭС, в которых в качестве источника используются солнечные батареи.

3. Количество публикаций, посвященных способам защиты авиационных электросетей как переменного, так и постоянного тока от аварийных дуговых разрядов относительно невелико. Этот факт объясняется наличием ряда неблагоприятных условий для работы блоков регистрации дугового разряда, а

именно: наличие широкополосных сетевых помех как от бортовой аппаратуры, так и от внешних источников; наличие импульсно-периодических нагрузок; присутствие большого числа информационных и радиочастотных кабелей; отсутствие выделенного нулевого (минусового) провода, в качестве которого используется каркас ЛА.

4. Представленные результаты исследований способов индикации дуги отражают общие направления в проектировании индикаторов дугового разряда для промышленных устройств и не могут быть в чистом виде использованы для обнаружения дугового разряда в авиационных сетях переменного тока по ряду причин:

- методы электрического обнаружения дуги подразумевают установку дополнительных датчиков в местах, удаленных от распределительных устройств системы электроснабжения и не могут быть применены, поскольку их использование ведет к существенному увеличению массогабаритных параметров бортовой кабельной сети;
- опубликованные методы индикации дуги, применяемые в составе автоматов защиты и коммутации, могут быть использованы в составе индикаторов дуги для авиационных сетей переменного тока, однако они обладают низкой помехозащищенностью, что приводит к большому количеству ложных срабатываний. Следует уделить внимание повышению степени помехозащищенности данного класса методов обнаружения дуги;
- опубликованные помехоустойчивые методы индикации дугового разряда (оптические, тепловые и электромагнитные) требуют кардинальных изменений в структуре систем электроснабжения летательных аппаратов, их применение влечет за собой увеличение массогабаритных параметров агрегатов систем электроснабжения и БКС, поэтому они не могут быть

применены в составе авиационных автоматов защиты сети с функцией гашения дуги.

5. В классе электрических методов обнаружения дугового разряда существуют две основные группы: обнаружение дуги по характерным её признакам, обнаружение дуги на основе сравнений аварийных электрических процессов с эталонными нормальными процессами. 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 большинство рассмотренных публикаций направлено на создание блоков распознавания дугового разряда, которые встраиваются в существующие тепловые автоматы защиты и коммутации. Практически не рассматривается применение транзисторных автоматов защиты и коммутации с использованием его диагностических возможностей для обнаружения аварийных токов нагрузки, их ограничения и отключения.

7. Рассмотренные публикации и патенты не содержат исчерпывающей технической информации, которая могла бы стать отправной точкой для теоретической и прикладной реализации схем и алгоритмов обнаружения и ликвидации аварийных дуговых разрядов в авиационных сетях переменного тока.

8. Выводы главы 1 позволяют сформулировать цель диссертационной работы: разработка методов обнаружения аварийных дуговых разрядов в авиационных сетях переменного тока; проектирование средств технической реализации данных методов в составе транзисторных аппаратов защиты и коммутации распределительных электросетей.

Глава 2 Исследование свойств параллельной дуги в авиационных системах электроснабжения переменного тока

В электросетях переменного тока могут возникать аварийные дуговые разряды двух типов: параллельного и последовательного (рисунок 2.1).

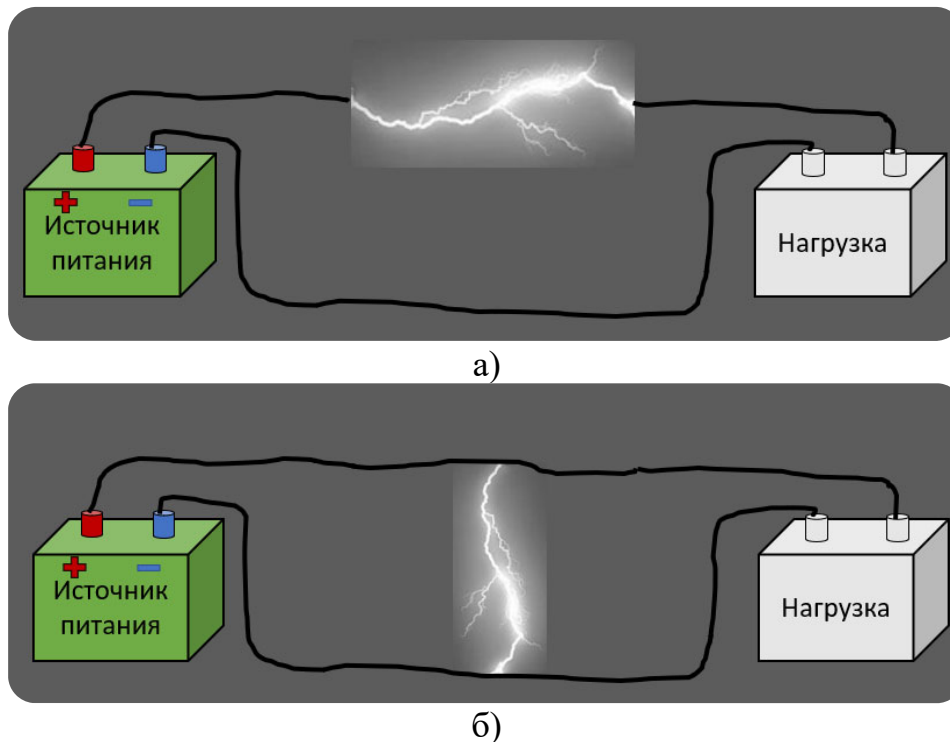


Рисунок 2.1 Виды аварийных дуговых разрядов (а – последовательный, б – параллельный)

Последовательный дуговой разряд является редко встречающимся видом отказа в авиационных системах электроснабжения, который возникает по причине обрыва токоведущей жилы провода без нарушения его изоляции или в результате неплотно затянутого болтового клеммного соединения.

Параллельный дуговой разряд является более распространенным отказом в системе распределения авиационных электросетей, который возникает из-за соприкосновения токопроводящей жилы провода с корпусом самолета. В отличие от короткого замыкания, параллельный дуговой разряд возникает вследствие периодического контакта токопроводящей жилы с каркасом ЛА, в том числе по

причине наличия вибрации корпуса и несущих конструкций ЛА, частота которых находится в пределах от 5 до 2000 Гц [65, стр. 14].

Контакт токопроводящей жилы проводника с конструкцией ЛА возможен из-за нарушения изоляции проводника, которое возникает либо из-за старения и растрескивания диэлектрического материала проводника, либо из-за воздействия токсичных жидкостей (керосин, гидравлическая жидкость и проч.), либо из-за механического повреждения изоляции о крепежные элементы или агрегаты самолета.

Все провода в системе распределения электроэнергии ЛА защищены специальными аппаратами защиты, в роли которых на современных отечественных ЛА выступают плавкие предохранители и механические автоматы защиты и коммутации. При возникновении короткого замыкания между проводником и корпусом ЛА в цепи резко увеличивается ток, что приводит к срабатыванию аппаратов защиты, которые отделяют данный участок цепи от всей системы электроснабжения. Однако при защите цепей питания мощных электроприводов, в которых возникают пусковые токи, номинал автоматов защиты и коммутации необходимо выбирать на ток больший, чем номинальный ток нагрузки. Это приводит к значительному увеличению времени срабатывания АЗК при периодически возникающем коротком замыкании (перемежающееся короткое замыкание), что не только ухудшает качество электроэнергии, но и значительно увеличивает вероятность возникновения пожара на борту. В ряде случаев, когда действующее значение тока нагрузки при перемежающемся коротком замыкании не превышает номинального значения, механические АЗК не распознают данный вид отказа.

В состав коммутационной аппаратуры систем распределения электроэнергии [28, стр.301] помимо механических АЗК входят силовые электромеханические контакторы, которые осуществляют переключение шин и цепей питания при ненормальном режиме работы систем электроснабжения. Данные устройства

обладают рядом недостатков: дребезг контактов, возникновение дугового разряда при переключении, высокое время переключения и низкая надёжность, – что существенно ухудшает качество электроэнергии и приводит к увеличению массы и объема входных фильтров потребителей электроэнергии.

Введение в состав систем электроснабжения современных ЛА коммутационной и защитной аппаратуры на основе полупроводниковых ключей (транзисторных АЗК) не только позволяет улучшить качество электроэнергии при ненормальном режиме работы СЭС, но предоставляет возможность отслеживать в режиме реального времени ряд параметров электросетей: величина протекающего тока нагрузки, отслеживание момента перехода переменного тока через ноль, отслеживание его частотного спектра [19, стр.153]. Отслеживание данных параметров позволяет реализовать следующий дополнительный функционал в транзисторных АЗК: ограничение переходных и аварийных токов нагрузки, коммутация нагрузок при оптимальных параметрах переменного тока и напряжения, обнаружение и ликвидации аварийных дуговых разрядов в цепях питания по их характерным признакам.

2.1 Имитационное компьютерное моделирование процессов коммутации нагрузок транзисторным ключом

Для моделирования процессов коммутации различных нагрузок, а также процессов ликвидации параллельного дугового разряда была разработана имитационная компьютерная модель транзисторного автомата защиты и коммутации. Функциональная схема транзисторного АЗК представлена на рисунке 2.2. Модель АЗК, выполненная в программном комплексе OrCAD PSpice показана на рисунке 2.3.

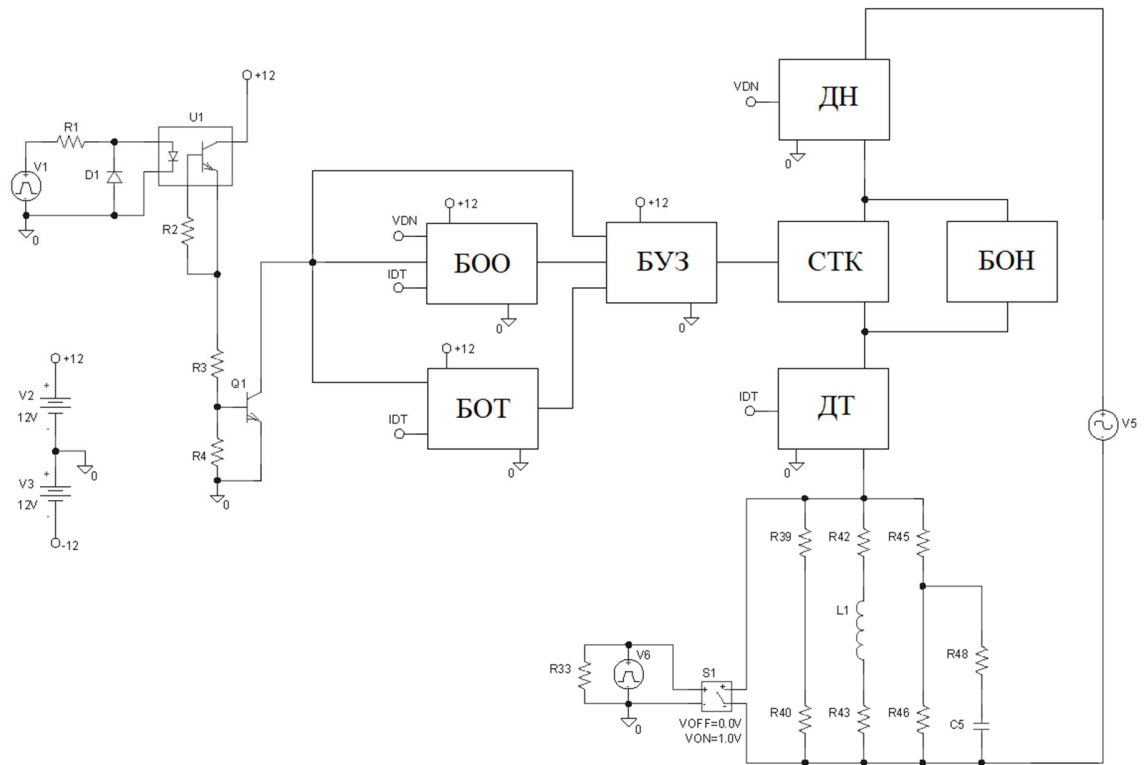


Рисунок 2.2 Функциональная схема транзисторного АЗК

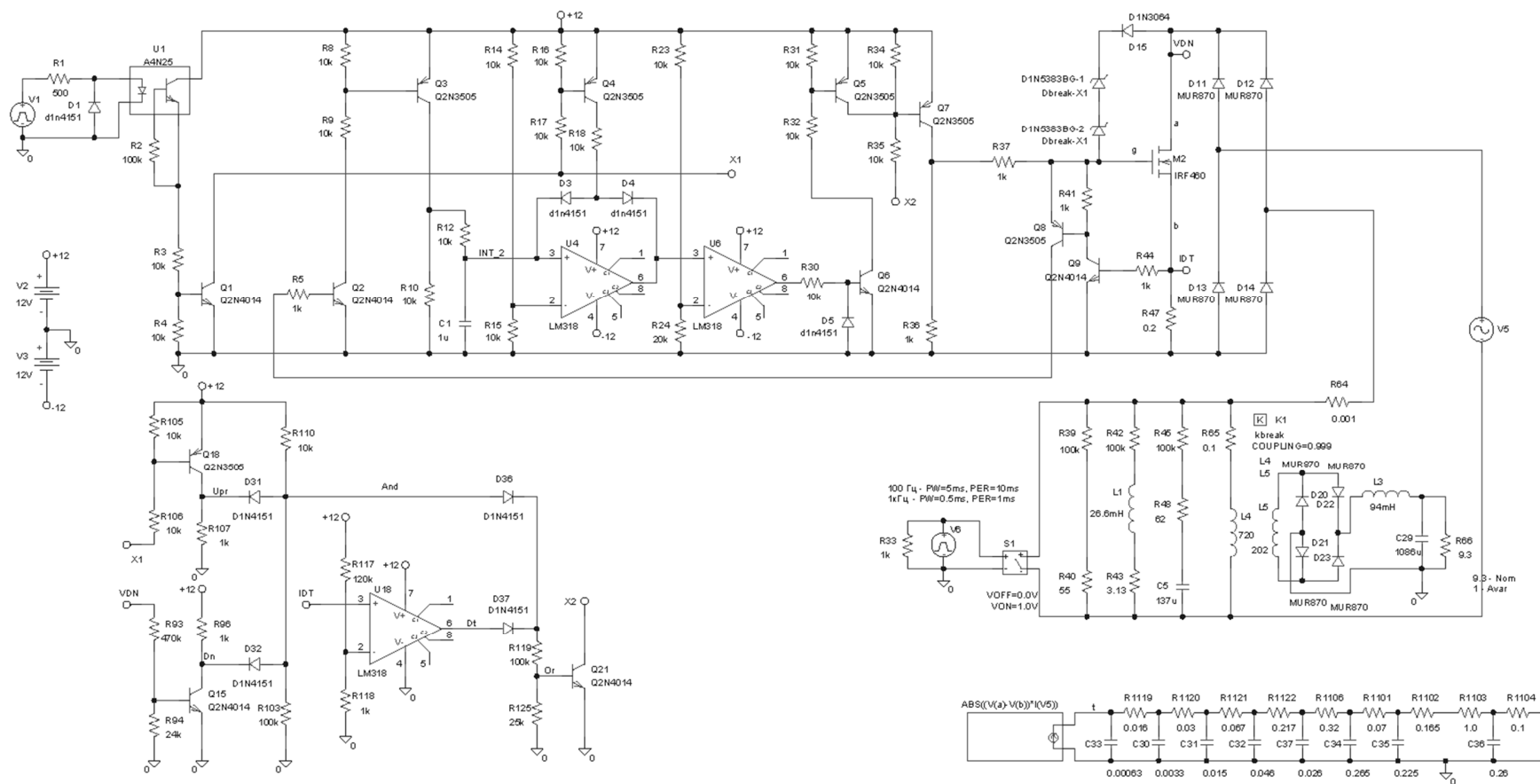


Рисунок 2.3 Имитационная компьютерная модель транзисторного АЗК

Модель транзисторного автомата защиты и коммутации состоит из:

- блока гальванической развязки входного сигнала, выполненного на резисторах R1, R2, R3 и R4, оптопаре U1, диоде D1 и транзисторе Q1;
- блока ограничения тока (БОТ);
- блока управления и защиты (БУЗ);
- силового транзисторного ключа (СТК);
- датчика тока (ДТ);
- блока ограничения напряжения (БОН);
- блока организации отключения RL-нагрузок (БОО).

В составе рассматриваемого транзисторного АЗК отсутствуют блоки, не участвующие в процессе индикации и ликвидации последовательного дугового разряда.

Блок организации отключения обеспечивает коммутацию силового ключа в момент, когда через него проходит минимальный ток или напряжение, что позволяет значительно снизить тепловой нагрев ключа. Модель блока организации отключения представлена на рисунке 2.4.

Блок состоит из логического элемента «И», выполненного на основе диодов D1, D2 и токоограничивающих резисторов R2 и R4. Транзистор Q1 и резисторы R1 и R10, R12 необходимы для подачи напряжения 12 В на вход логического элемента «И» при поступлении сигнала управления. Резисторы R9 и R3 задают порог срабатывания датчика напряжения, который с помощью транзистора Q2 подает на вход логического элемента «И» 12 В при прохождении напряжения на ключе через ноль. Диоды D3 и D4 и токоограничивающие резисторы R8 и R7 формируют логический элемент «ИЛИ», на входы которого подаются сигналы с логического элемента «И» и датчика тока. Сигнал с датчика тока формируется с помощью компаратора U1 и делителя напряжения на R5 и R6, задающего порог срабатывания.

Выбор компаратора в схеме вместо транзисторного усилителя обусловлен необходимостью обеспечения максимального быстродействия датчика тока.

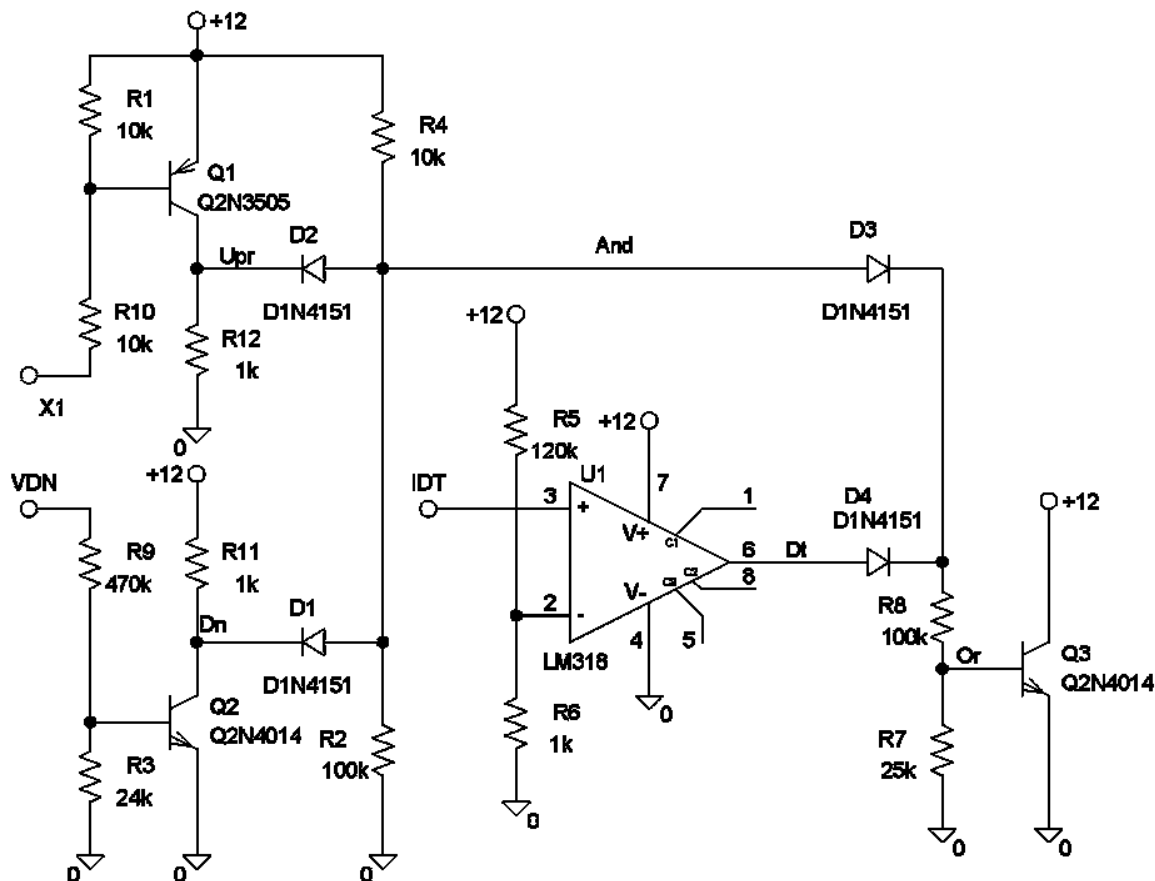
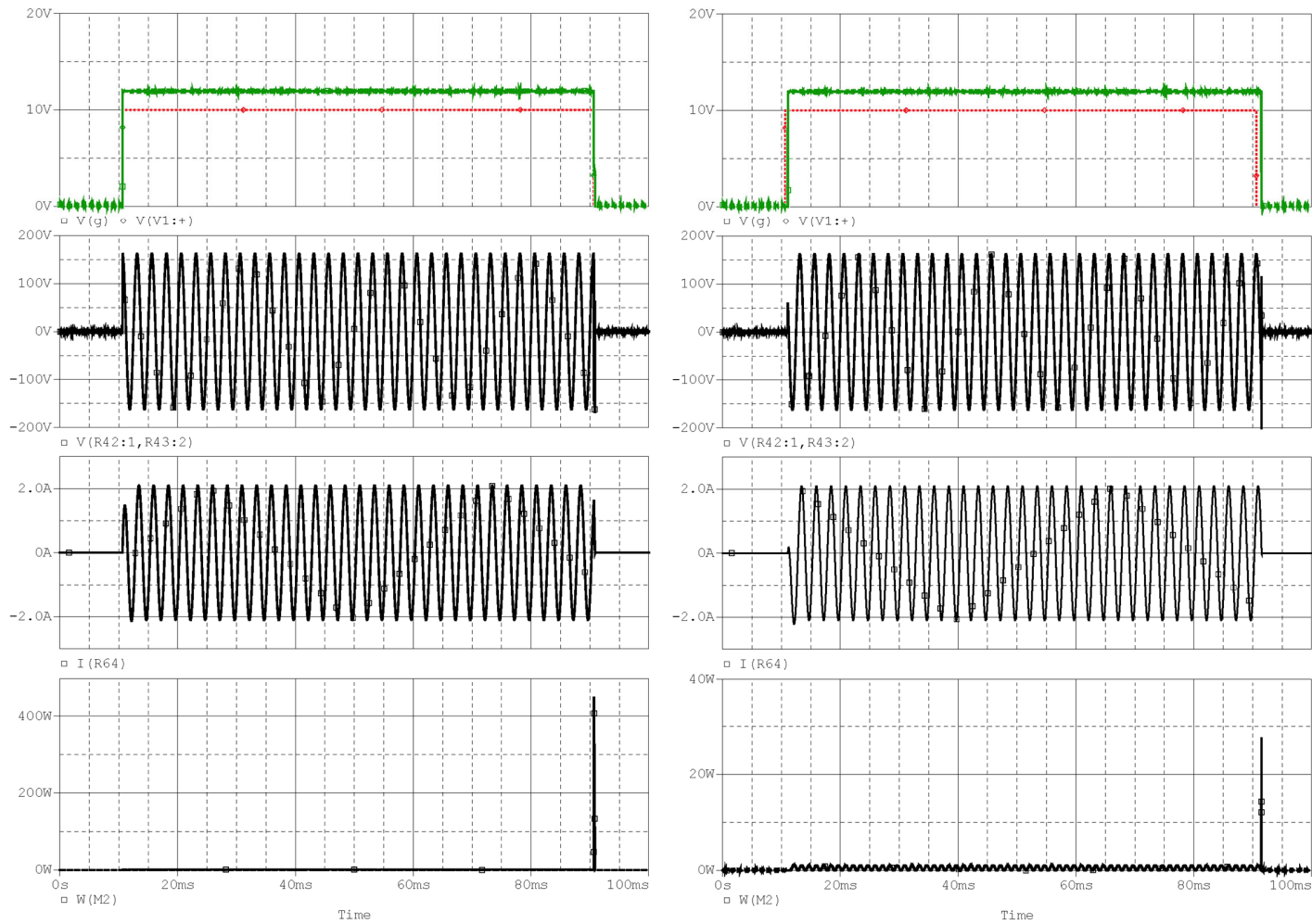


Рисунок 2.4 Имитационная компьютерная модель блока организации отключения нагрузки, выполненная в программном комплексе OrCAD PSpice

Результаты моделирования процессов коммутации RL нагрузки транзисторным АЗК оборудованным блоком организации отключения и без него показаны на рисунке 2.5.



а)

б)

Рисунок 2.5 Результаты моделирования процессов коммутации нагрузки транзисторным АЗК без блока БОО (а) и оборудованного блоком БОО (б)

На первом графике красным показан сигнал управления, зеленым напряжение на затворе силового транзистора. На втором и третьем графике представлены напряжение и ток на нагрузке. Результаты моделирования показывают, что блок организации отключения нагрузки, находящийся в составе транзисторного АЗК, при коммутации RL нагрузки задерживает сигнал на включение/отключение силового транзистора, переключая его состояние в наиболее выгодном моменте. Включение силового транзистора происходит при переходе переменного напряжения через ноль, а отключение – при переходе переменного тока через ноль. Таким образом, в результате работы БОО тепловой нагрев ключа (график 4) снижается практически в 10 раз.

С целью дальнейшего исследования процессов коммутации и свойств параллельного дугового разряда, возникающего при перемежающемся КЗ, была промоделирована работа транзисторного АЗК с R, RL и RC нагрузками, а также с мостовым выпрямителем, имитирующим работу нагрузки типа выпрямительное устройство, которые показаны на рисунке 2.6.

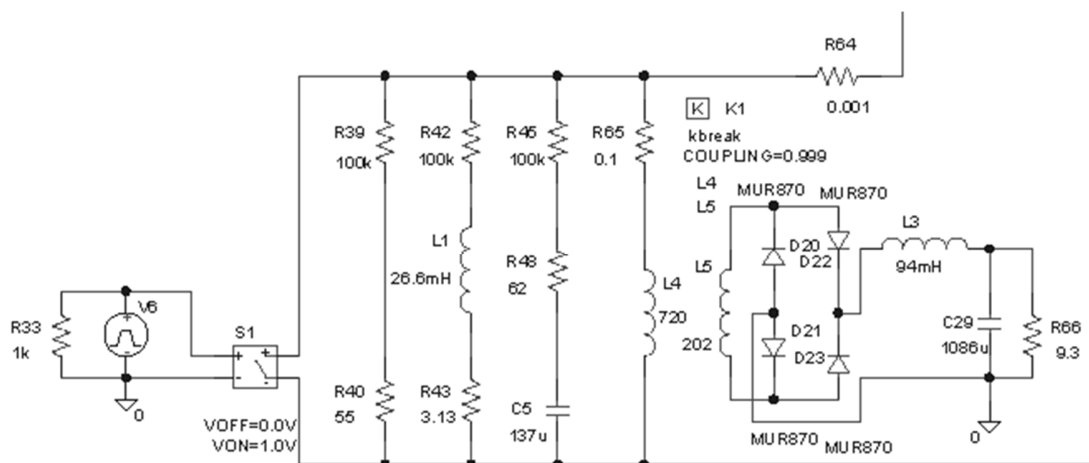


Рисунок 2.6 Модель нагрузок, выполненная в программном комплексе OrCAD PSpice

Нагрузка в математической модели представлена:
 — резистором R40, имитирующим R-нагрузку;

- резистором R43 и индуктивностью L1, имитирующими RL-нагрузку;
- резистором R48 и емкостью C5, имитирующим RC-нагрузку;
- диодами D20-D23, индуктивностью L3 и емкостью C29, имитирующими выпрямитель с Г-образным индуктивно-ёмкостным LC фильтром и резистором R66, имитирующим резистивную нагрузку выпрямителя.

Постоянная времени RL и RC нагрузки согласно ОСТ 1 00195-76 составляет 8,5 мс. Резисторы R39, R42 и R45 используются для переключения между различными типами нагрузок.

В нагрузке, имитирующей работу вторичного источника питания (ВИП), для эффективного сглаживания пульсаций после мостового выпрямителя на диодах D20-D23, применяется Г-образный индуктивно-ёмкостной LC фильтр 2-го порядка.

Величина индуктивности и емкости рассчитаны следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{C}{L} = \frac{10^6}{R_H^2} \\ LC = \frac{12500}{f^2 K_{\Pi}} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} C = \frac{L \cdot 10^6}{R_H^2} \\ L = \frac{12500 \cdot R_H^2}{L \cdot 10^6 \cdot 400^2 \cdot 0,1} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} C = \frac{94 \cdot 10^3}{9,3^2} \approx 1086 \text{ мкФ} \\ L = \sqrt{\frac{0,781 \cdot 10^{-6}}{9,3^2}} = 94 \text{ мГн} \end{array} \right.$$

Проверка:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 1086 \cdot 10^{-6}} = 0,37 \ll R_H (= 9,3 \text{ Ом})$$

$$X_L = \omega L = 2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 94 \cdot 10^{-3} = 236 \gg R_H (= 9,3 \text{ Ом})$$

Имитационное компьютерное моделирование транзисторного АЗК проводилось для 4-х режимов работы:

- коммутация нагрузки при номинальном токе;
- коммутация нагрузки при переходных токах;
- коммутация при коротком замыкании;
- коммутация при перемежающемся коротком замыкании (частота замыкания 100 Гц и 1 кГц).

2.1.1 Коммутации нагрузок при номинальном токе

Временные диаграммы тока, напряжений и температуры кристалла при коммутации нагрузок при номинальным действующем токе 2 А показаны на рисунках 2.7-2.10.

Сигнал на включение подается на вход транзисторного АЗК при $t=11$ мс моделирования, снятие сигнала происходит через 80 мс. На первом графике показано изменение входного сигнала в процессе моделирования, на втором и третьем графике – напряжение на силовом ключе и нагрузке соответственно. Тонкой линией на графике 2 изображено напряжение сети. На четвертом графике – временной процесс протекания тока нагрузки. На пятом графике – рост температуры кристалла в °С относительно температуры основания, на которое он установлен.

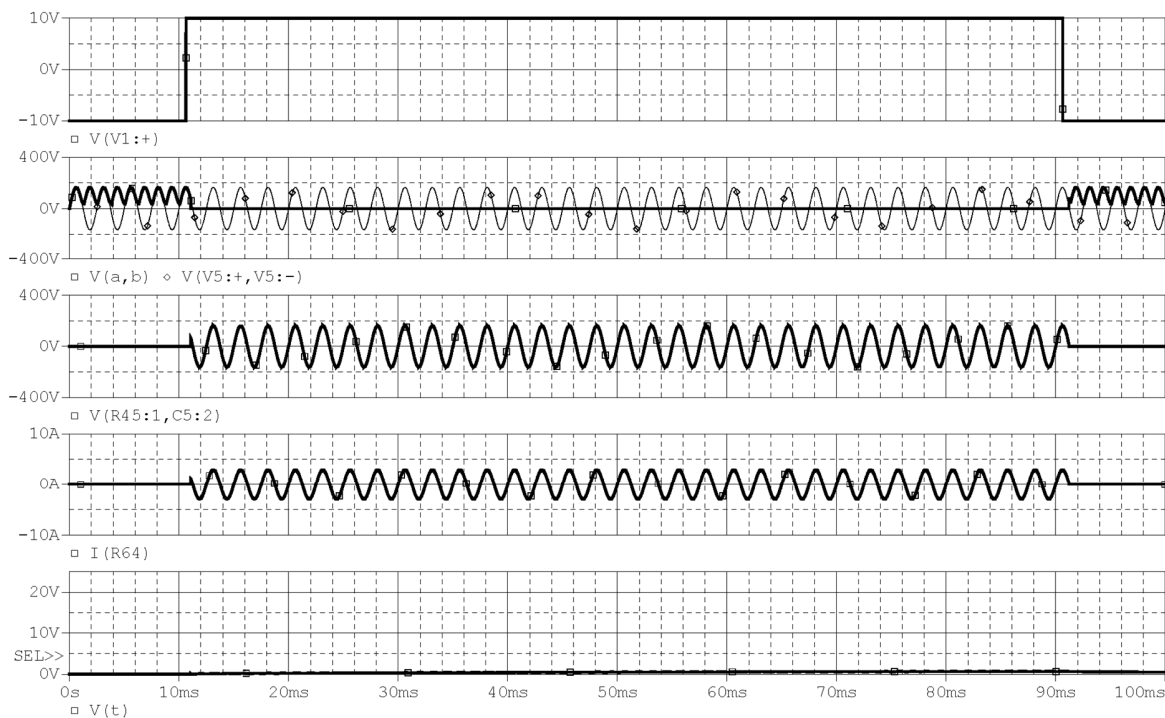


Рисунок 2.7 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации резистивной нагрузки при номинальном токе

В процессе коммутации резистивной нагрузки отсутствуют любые особенности. Включение и отключение АЗК происходит при нуле тока и напряжения. Температура нагрева кристалла плавно повышается в течении работы силового транзистора в области насыщения, выходя на постоянную температуру примерно через 70-75 мс после включения.

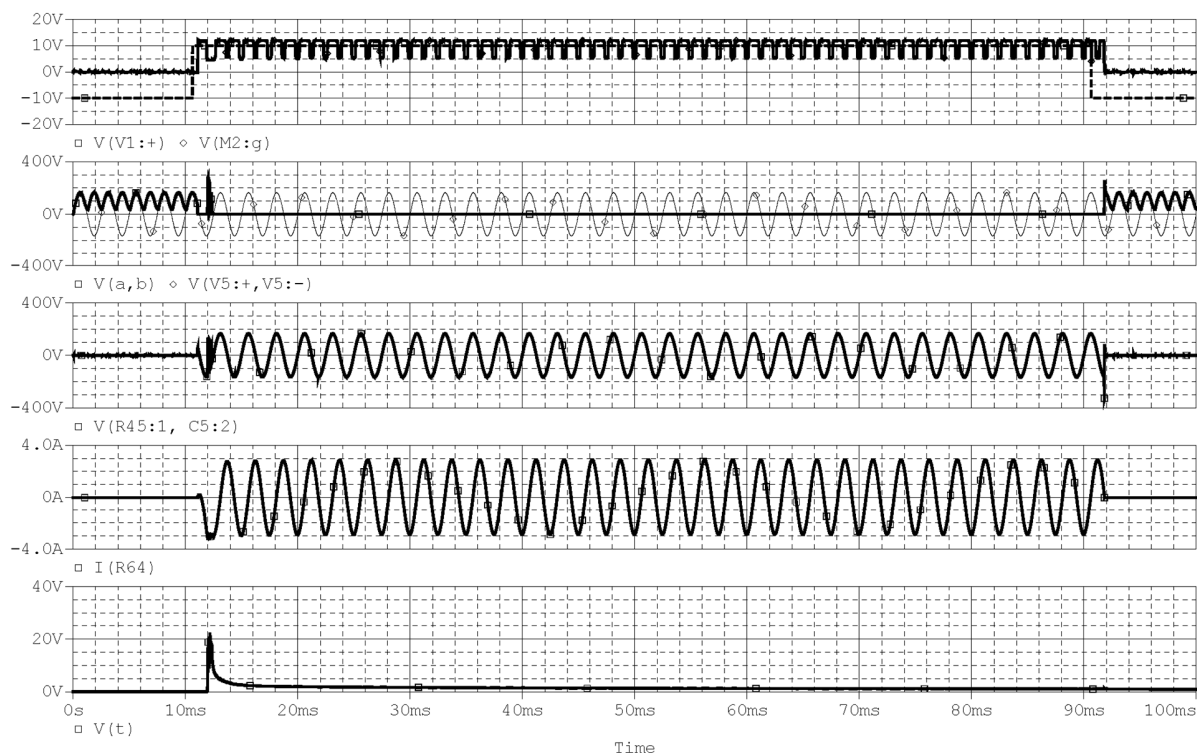


Рисунок 2.8 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации RL нагрузки с номинальным током

В процессе коммутации индуктивно-резистивной нагрузки благодаря работе БОО коммутация АЗК происходит без значительного роста температуры кристалла силового ключа. Температура кристалла резко повышается при включении нагрузки, что обусловлено ограничением переходных токов при включении индуктивно-резистивной нагрузки. Далее температура плавно снижается в течении работы силового транзистора в области насыщения, выходя на постоянную температуру примерно через 70-75 мс после включения.

При коммутации индуктивно-резистивной нагрузки хорошо заметен сдвиг фаз между током и напряжением (график 3 и 4 соответственно). Благодаря наличию БОО срабатывание АЗК происходит в момент перехода напряжения через ноль (график 3: напряжение к нагрузке подводится практически при переходе синусоиды через ноль; небольшой начальный скачок напряжения обусловлен скоротечностью процесса и ограниченным быстродействием блока организации отключения. Выключение АЗК при коммутации номинального тока (рисунок 7) происходит при нуле тока (график 4), что вызывает незначительное перенапряжение на силовом транзисторном ключе (график 2) и практически не вызывает перегрев кристалла силового ключа.

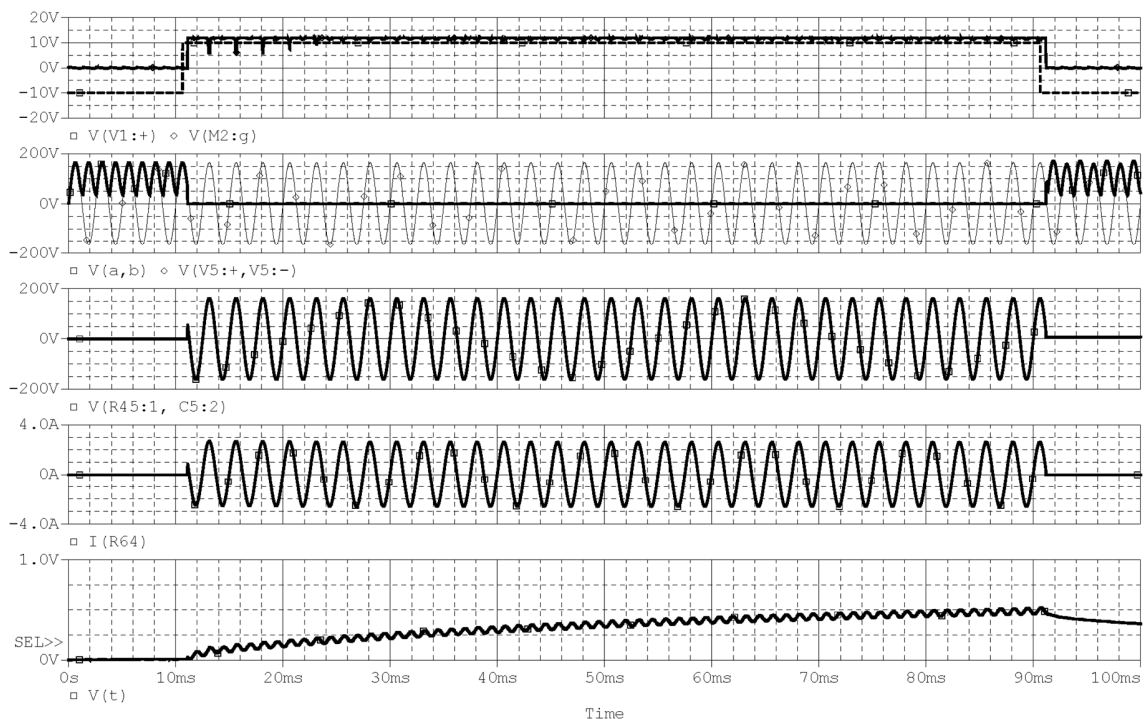


Рисунок 2.9 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации RC нагрузки при номинальном токе

Процесс коммутации RC-нагрузки не отличается от процессов коммутации R-нагрузки. На графиках отсутствуют перенапряжения на силовом ключе, а также отчетливо наблюдается процесс включения при нуле напряжения и отключения при нуле тока.

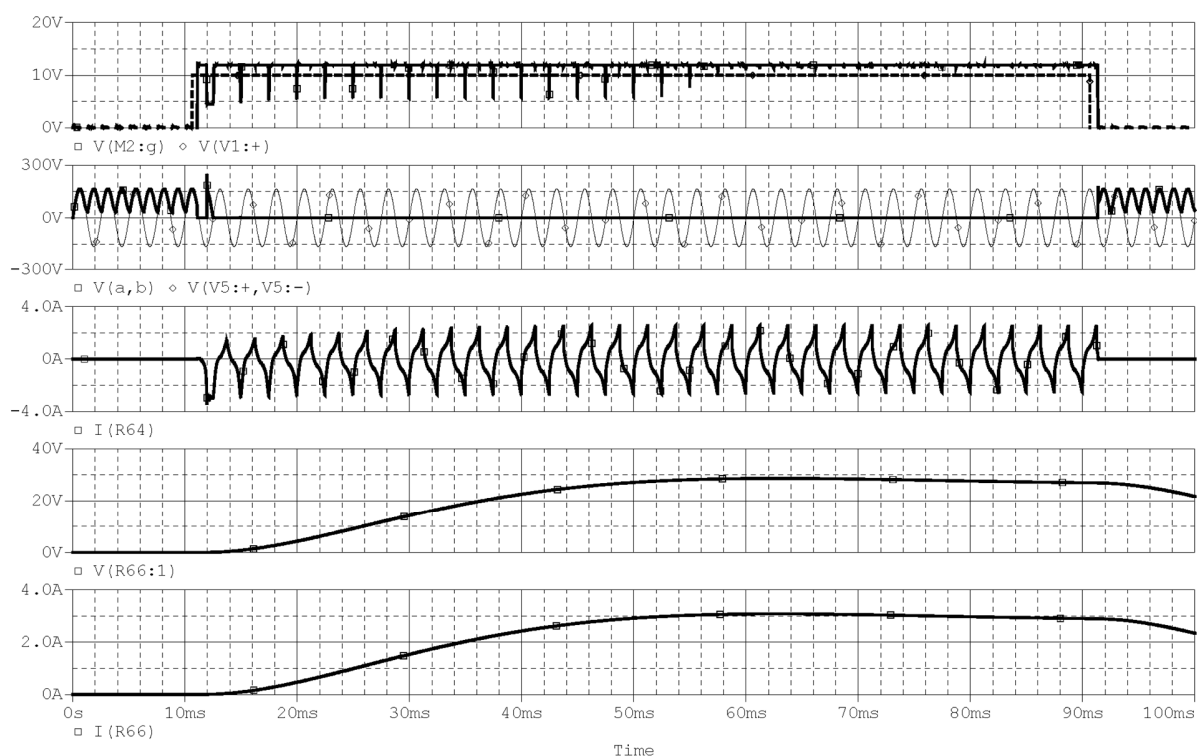


Рисунок 2.10 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации нагрузки, имитирующей работу ВИП, при номинальном токе

В процессе коммутации нагрузки, имитирующей работу ВИП, наблюдаются переходные токи в цепи питания ВИП (график 3). Благодаря работе силового ключа в резистивной области амплитуда тока нагрузки не превышает величины 3 А. Работа силового ключа в резистивной области наблюдается на графике напряжения на затворе силового транзистора (график 1). Переходные токи при включении нагрузки вызваны индуктивным характером сглаживающего Г-образного LC-фильтра 2 порядка. Поскольку переходный процесс был кратковременным, и ток нагрузки вернулся к номинальному уровню, то отключение АЗК не последовало. На графиках 4 и 5 показано выходное напряжение и ток ВИП, на которых отчётливо наблюдается выход ВИП на номинальный режим работы. Отключение силового транзистора происходит после снятия сигнала управления, при нуле тока и без перенапряжений на нем.

2.1.2 Коммутации нагрузок при переходном токе

Переходный ток – это ток, который возникает в цепи при протекании переходных процессов. По номиналу ток превышает значение номинального тока, но при этом не является аварийным. Переходные токи возникают при коммутации нагрузок со значительной индуктивностью или большой емкостью.

Для транзисторного автомата защиты и коммутации важной характеристикой является способность пропускать непродолжительное время переходные токи, при этом ограничивая их амплитуду номинальным значением. С этой целью в схеме бесконтактного автомата защиты и коммутации (АЗКБ) присутствует БОТ.

Порог ограничения тока может быть установлен двумя способами: стабильный порог ограничения тока, который задается схемотехнически, например, делителем напряжения и который нельзя изменить; регулируемый порог ограничения тока, который зависит от напряжения на ключе. При напряжении на ключе равном 0, порог ограничения тока – максимальный, однако при увеличении напряжения на ключе этот уровень снижается. Реализация постоянного и регулируемого порога ограничения тока показана на рисунке 2.11.

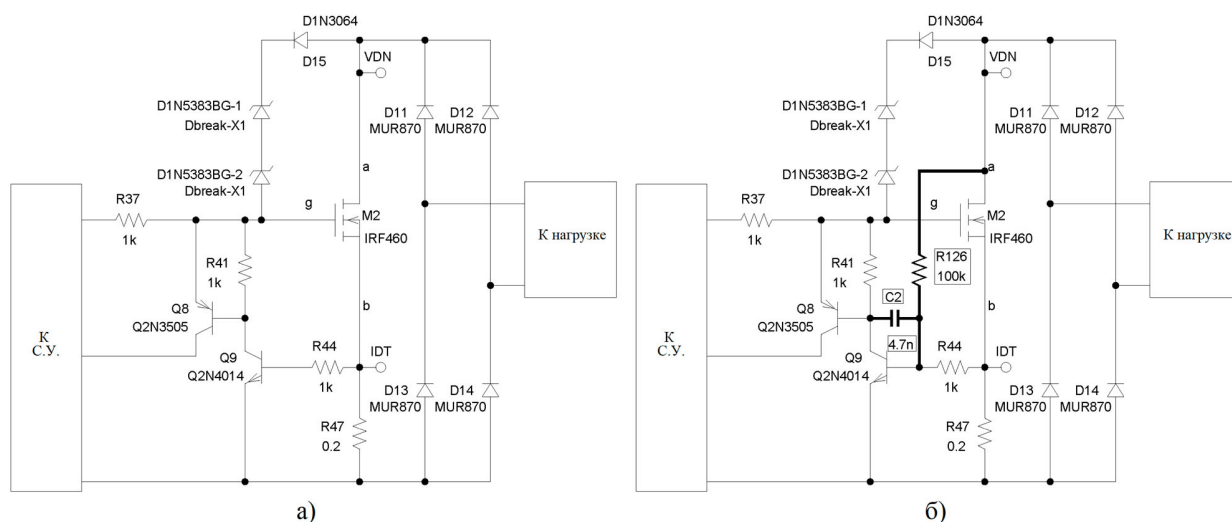


Рисунок 2.11 Реализация постоянного (а) и регулируемого (б) порога ограничения тока

Регулируемый порог ограничения тока выполнен с помощью резистора R126 и конденсатора C2. При возникновении напряжения на силовом транзисторе M2 ток, протекающий через резистор R126 приоткрывает транзистор Q9, таким образом уменьшается порог ограничения тока, а при возникновении аварийных токов сокращается время срабатывания цепей защиты транзисторного АЗК.

Временные диаграммы, показывающие работу регулируемого ограничения тока в транзисторном АЗК переменного тока изображены на рисунке 2.12.

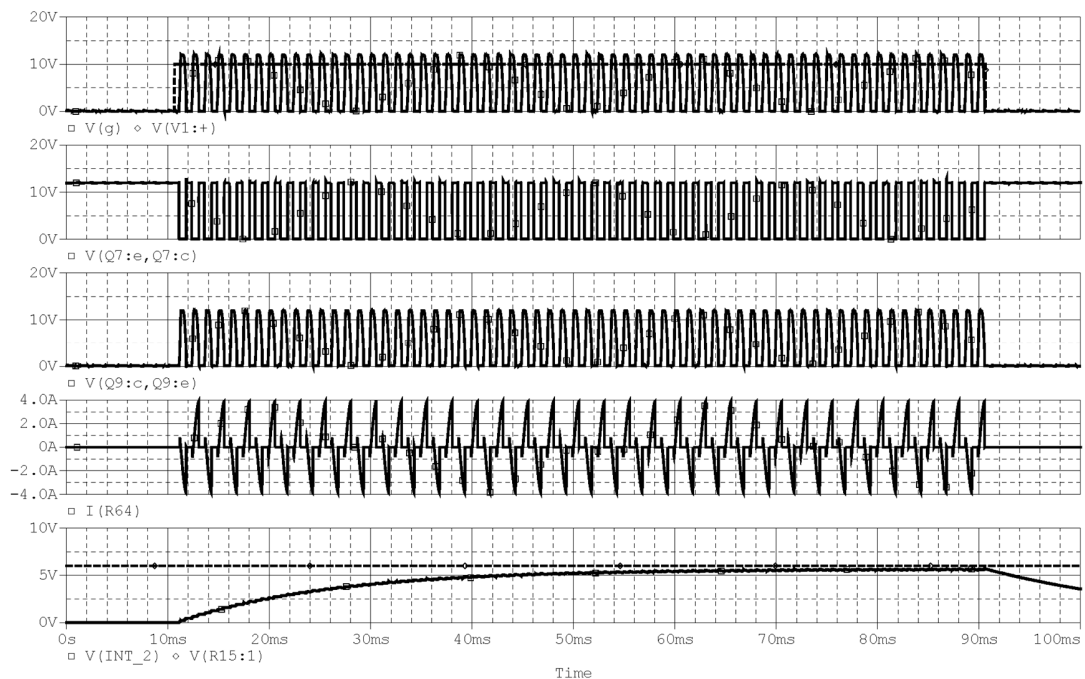


Рисунок 2.12 Временные диаграммы, показывающие работу ограничителя тока с регулируемым порогом, при протекании переходных токов и включенном блоке организации отключения

На первом графике показан сигнал управления и напряжение на затворе транзистора M2. Отчетливо заметно, что при протекании переходного тока величиной 4 А схема самостоятельно не отключает силовой транзистор. Если обратится ко второму графику, который показывает падение напряжения на выходном транзисторе системы управления, то заметно ошибочное поведение системы управления, которое обусловлено реакцией блока организации

отключения на прохождение тока через ноль (график 4). При этом следует отметить, что напряжение «INT_2», которое задает время работы транзисторного АЗК на переходном токе, не достигает порогового значения из-за работы блока организации отключения. Временные диаграммы работы ограничителя тока при отключенном БОО показаны на рисунке 2.13.

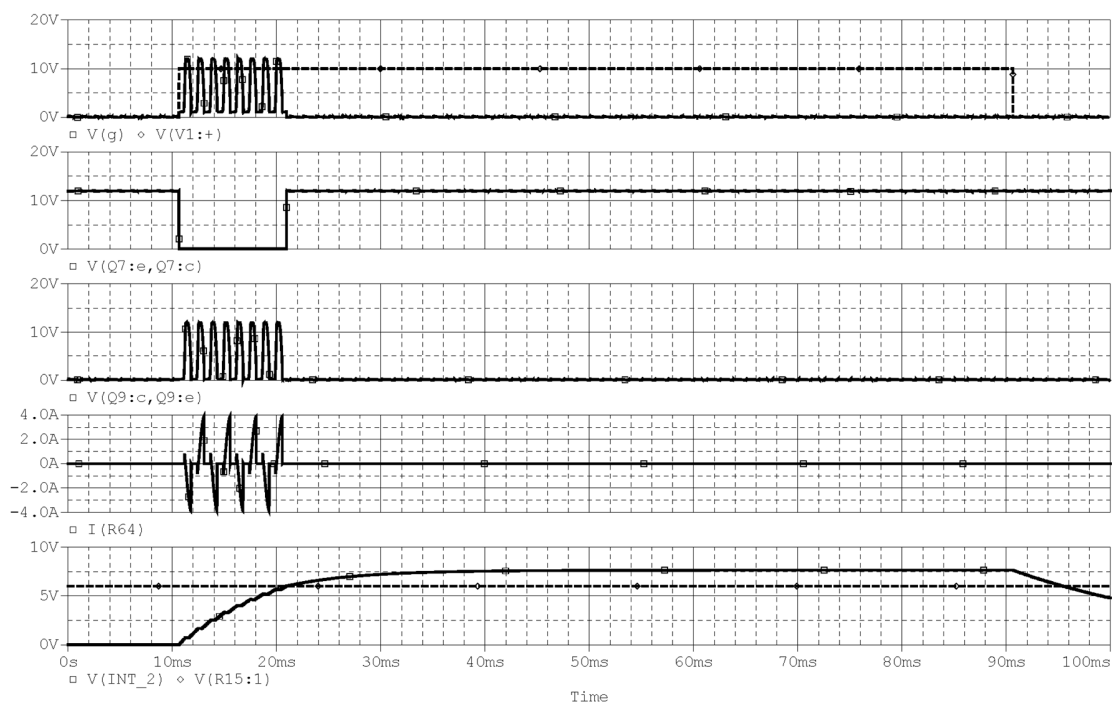


Рисунок 2.13 Временные диаграммы, показывающие работу ограничителя тока с регулируемым порогом, при протекании переходных токов и отсутствии блока организации отключения

На первом графике отчетливо наблюдается снижение напряжения на затворе силового транзистора до снятия сигнала управления, то есть штатная работа системы управления транзисторным АЗК по ограничению переходных токов. Падение напряжения на выходном транзисторе системы управления (график 2) совпадает с превышением напряжение INT_2 порогового значения (график 5), что также показывает штатную работу системы управления. Однако, если обратиться к графику 4, который показывает ток нагрузки, то наблюдается «обрезание» полуволны тока после достижения отметки 4 А, хотя ток при этом должен был

ограничиваться величиной 3 А без существенного изменения формы тока. График 3, отражающий падение напряжения на транзисторе Q9, показывает, что транзистор в момент, когда ток превышает номинальное значение полностью открывается и отключает силовой транзистор M2 до момента наступления следующей полуволны. Это некорректное поведение, так как транзистор Q9 должен находиться в этот момент в резистивной области, чтобы уменьшить напряжение на затворе транзистора M2, которое в свою очередь выведет транзистор M2 в активную область и ограничит ток нагрузки на уровне номинального тока. Такое поведение транзистора Q9 вызвано как раз работой регулируемого ограничителя тока нагрузки. Следовательно, для корректной работы транзисторного АЗК с переходными токами необходимо использовать только постоянный уровень ограничения тока. Временные диаграммы работы транзисторного АЗК с постоянным ограничением тока и включенным БОО показаны на рисунке 2.14.

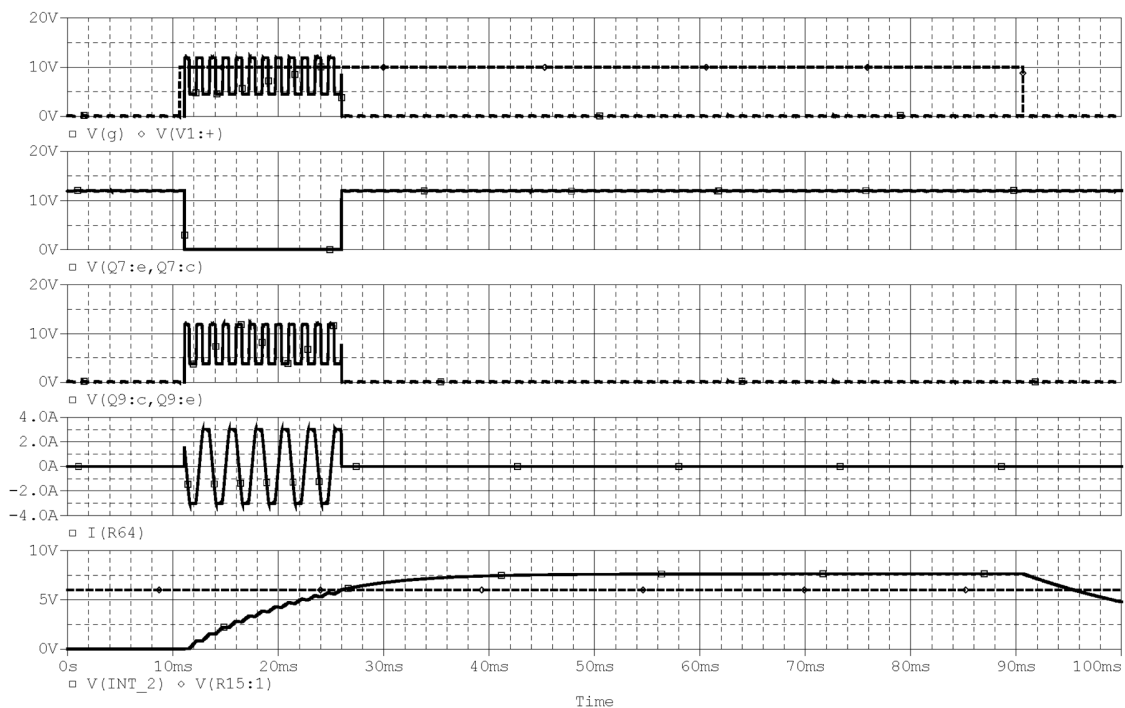


Рисунок 2.14 Временные диаграммы, показывающие работу ограничителя тока с постоянным порогом, при протекании переходных токов и включенным блоке организации отключения

На графиках наблюдается штатная работа системы управления транзисторным АЗК, которая при превышении установленного времени протекания переходного тока отключила силовой транзистор. При этом ток нагрузки (график 4) не обрезается, а амплитудное значение ограничено номинальным током 3 А.

Временные диаграммы коммутации транзисторным АЗК различных нагрузок показаны на рисунках 2.15 – 2.18.

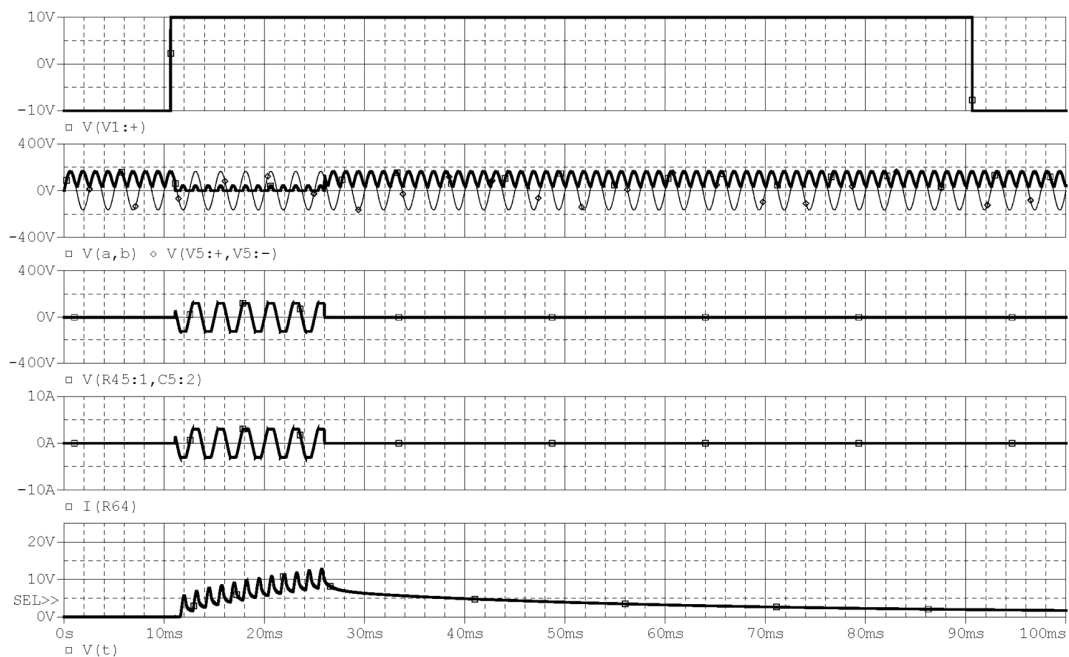


Рисунок 2.15 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации R нагрузки при переходном токе

При коммутации резистивной нагрузки с переходным током, амплитуда которого выше номинального, наблюдается работа блока ограничения тока. Благодаря работе силового транзисторного ключа в резистивной области амплитудное значение тока нагрузки не превышает 3 А, при этом наблюдается значительный нагрев кристалла силового ключа.

Согласно [63, стр. 27] нормальные переходные процессы в сетях переменного тока имеют жестко ограниченные временные рамки. В данном процессе коммутации с течением времени ток нагрузки не снизился до номинальных

значений, таким образом процесс коммутации становится аварийным, что приводит к отключению транзисторного АЗК.

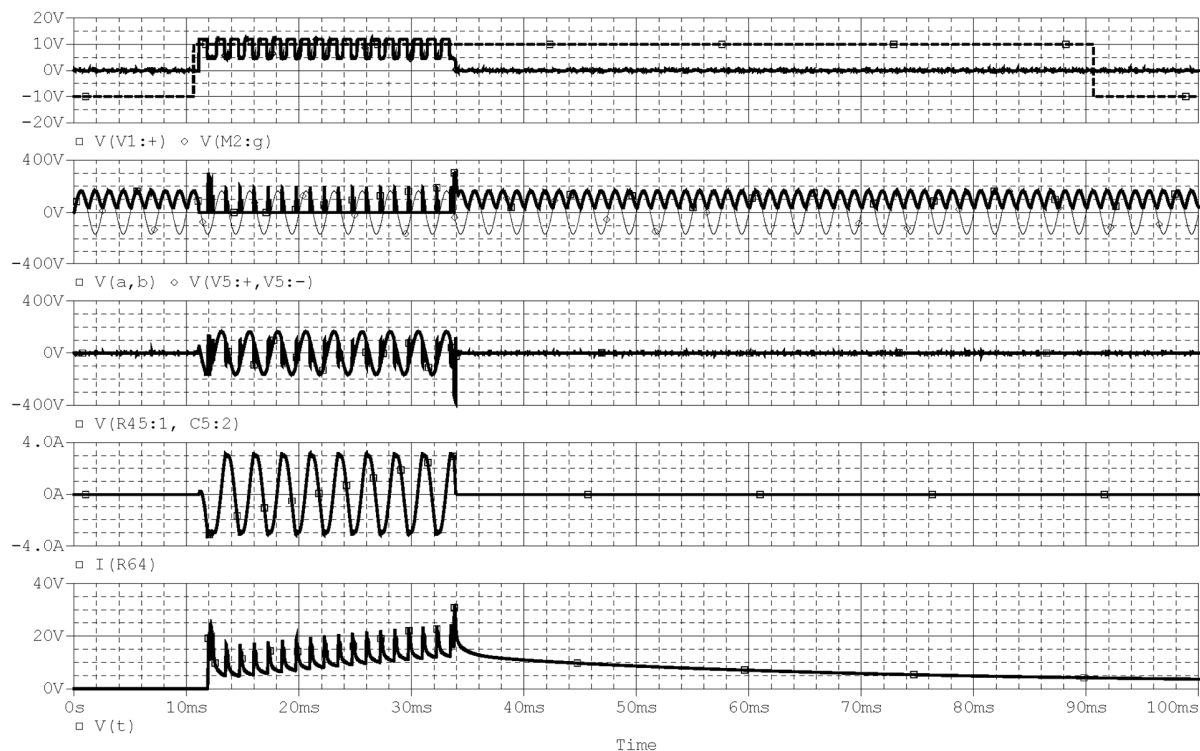


Рисунок 2.16 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации RL нагрузки при переходном токе

При коммутации индуктивно-резистивной нагрузки с переходным током наблюдается работа блока ограничения тока. Благодаря работе силового транзисторного ключа в резистивной области амплитудное значение тока нагрузки не превышает 3 А, при этом наблюдается постепенный нагрев кристалла силового ключа. Аналогично процессам коммутации резистивной нагрузки через определенное время, не превышающем требований ГОСТ Р 54073-2017 для нормальных переходных процессов, происходит отключение транзисторного АЗК.

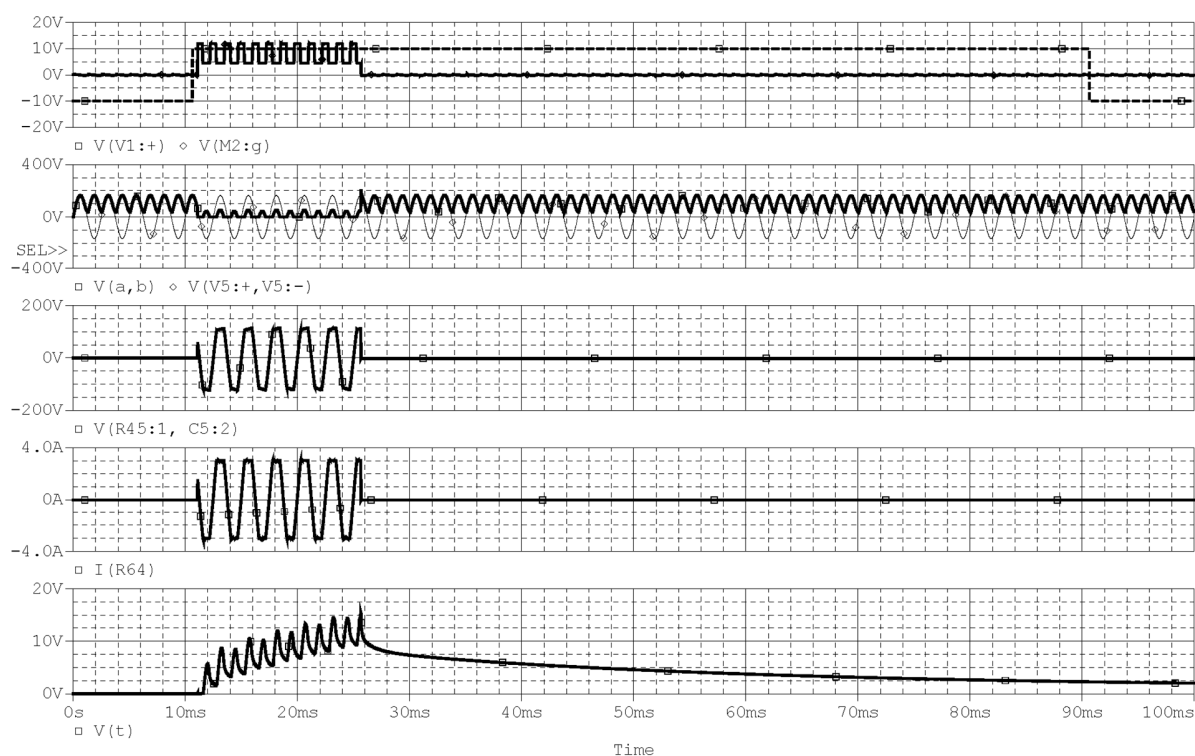


Рисунок 2.17 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации RC нагрузки при переходном токе

Процесс коммутации емкостно-резистивных нагрузки с переходным током практически не отличается от процесса коммутации резистивной нагрузки. Единственная особенность заключается в немного большем росте температуры кристалла силового ключа, по сравнению с температурой кристалла при коммутации резистивной нагрузки. Время ограничения переходным процессом в цепи не превышает требований ГОСТ Р 54073-2017.

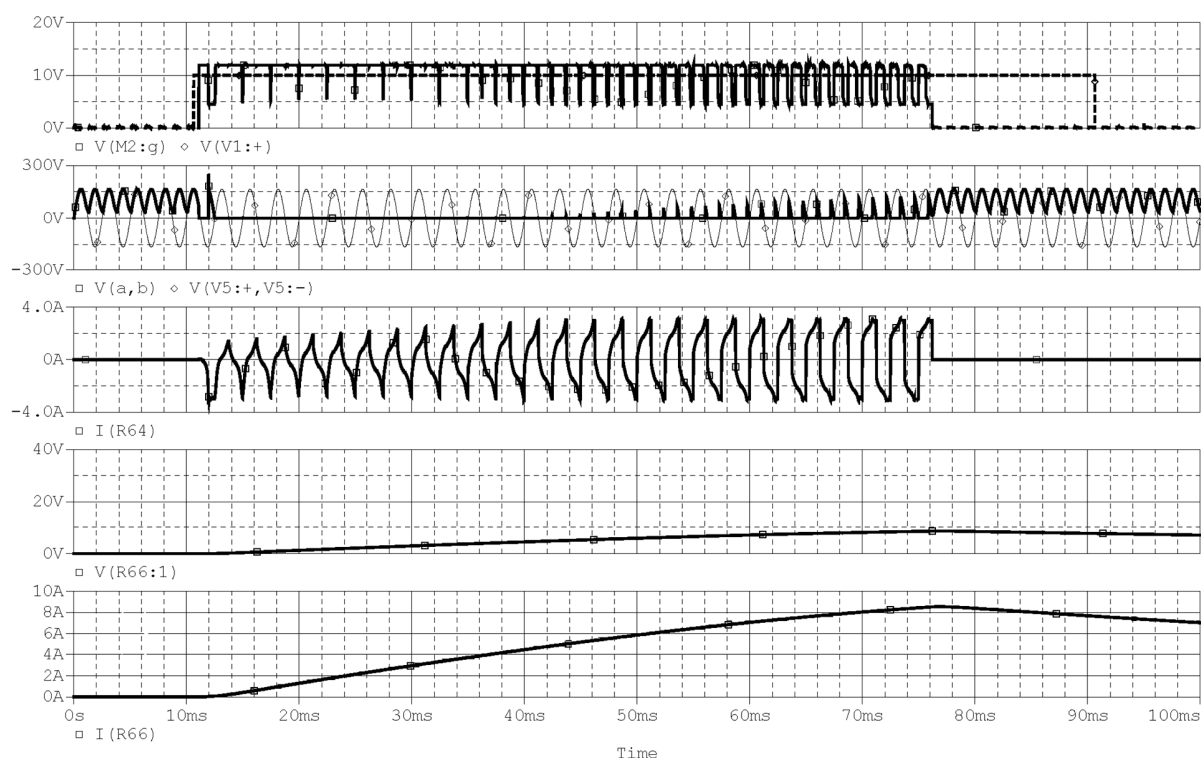


Рисунок 2.18 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации нагрузки, имитирующей работу ВИП, при переходном токе

В процессе коммутации нагрузки, имитирующей работу вторичного источника питания, с током потребления по цепи ВИП значительно превышающем номинальной величины наблюдается ограничение переходных токов и работа силового ключа в резистивной области (график 1). При включении нагрузки, переходные токи вызваны индуктивным характером сглаживающего Г-образного LC-фильтра 2 порядка. После выхода на номинальным режим работы ВИП наблюдается значительный рост тока нагрузки ВИП (график 5), что приводит к просадке выходного напряжения ВИП (график 4) и росту потребляемого тока (график 3). Амплитуда потребляемого тока ВИП ограничена величиной 3 А, благодаря работе силового ключа в резистивной области. По истечении отведенного времени для протекания переходных токов наблюдается отключение АЗК. Следует отметить, что отключение АЗК произошло раньше, чем был снят

сигнал управления (график 1), вследствие работы схемы защиты силового ключа по току.

2.1.3 Коммутации нагрузок при коротком замыкании

Параллельное короткое замыкание имитируется с помощью источника напряжения V6, драйвера S1 и шунтирующего резистора R33. Источник напряжения позволяет имитировать как перемежающееся, так и «глухое» короткое замыкание. Поскольку короткое замыкание происходит в фидере питания нагрузки, то происходящие в цепи процессы не зависят от типа нагрузки, таким образом результаты моделирования работы АЗК при возникновении «глухого» короткого замыкания были проведены только для индуктивно-резистивной нагрузки (рисунок 2.19).

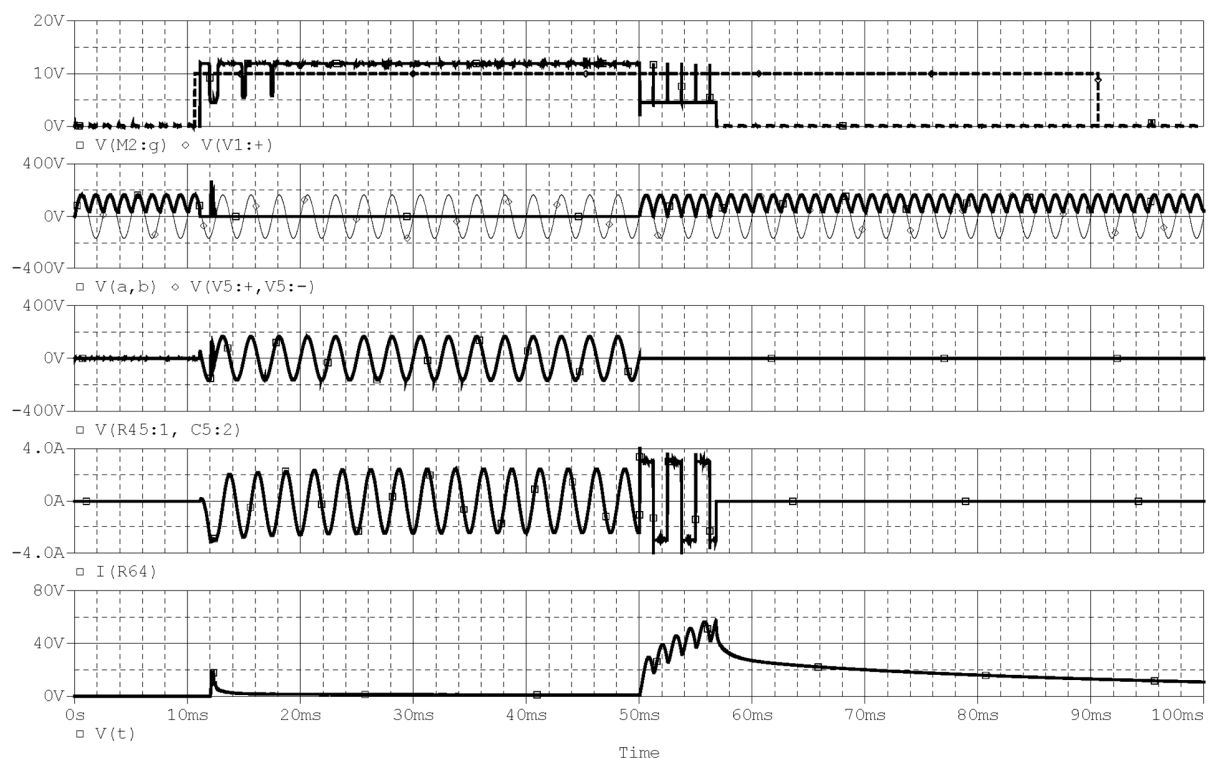


Рисунок 2.19 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации RL нагрузки при возникновении короткого замыкания ($t=50$ мс)

Возникновение «глухого» короткого замыкания при коммутации индуктивно-резистивной нагрузки сопровождается резким увеличением тока нагрузки (график 4). Амплитуда тока при этом ограничивается величиной 3 А, благодаря работе силового ключа в резистивной области (график 1). Транзисторный АЗК ограничивает ток нагрузки некоторое время, по истечении которого нагрузка отключается. На графике 5 отчетливо наблюдается рост температуры кристалла силового ключа из-за работы в резистивной области, время ограничения аварийных токов выбрано таким образом, чтобы не перегреть силовой транзистор. Следует отметить, что возникновение короткого замыкания сопровождается токами в десятки раз превышающее номинальное значение тока нагрузки, вследствие чего срабатывание АЗК происходит за время меньшее, чем при ограничении переходных токов.

Повторное включение АЗК после возникновения короткого замыкания возможно только после снятия сигнала управления.

2.1.4 Коммутации нагрузок при перемежающемся коротком замыкании

Частота вибрации корпуса и несущих конструкций ЛА находится в пределах от 5 до 2000 Гц [65, стр. 14], следовательно, перемежающееся короткое замыкание, которое возникает по причине вибрации конструкций, будет происходить в аналогичном диапазоне частот. Логично предположить, что работа транзисторного АЗК при низкочастотном (до 200 Гц) и высокочастотном (свыше 200 Гц) перемежающемся коротком замыкании будет отличаться, поэтому для проведения компьютерного моделирования работы транзисторного АЗК были выбраны две фиксированные частоты: 100 Гц и 1000 Гц.

Для имитации параллельного перемежающегося короткого замыкания источник напряжения V6 настроен таким образом, чтобы он выдавал на драйвер S1

меандр с частотой 100 или 1000 Гц. Результаты моделирования работы транзисторного АЗК при возникновении перемежающегося короткого замыкания с частотой 100 Гц для индуктивно-резистивной нагрузке представлены на рисунке 2.20, для перемежающегося короткого замыкания с частотой 1000 Гц – на рисунке 2.21. Имитационное компьютерное моделирование работы транзисторного АЗК было проведено только для индуктивно-резистивной нагрузки, поскольку короткое замыкание происходит в питающем фидере, то есть происходящие в цепи процессы не зависят от типа нагрузки.

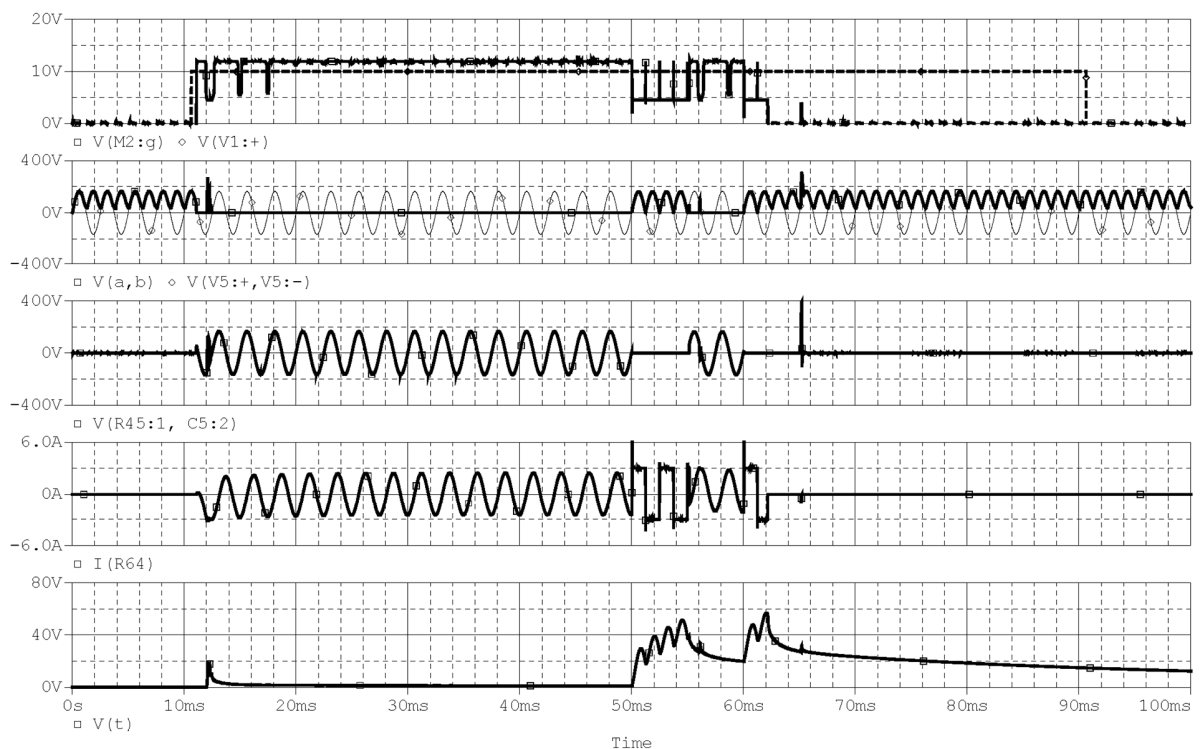


Рисунок 2.20 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации RL нагрузки при возникновении перемежающегося короткого замыкания ($t=50$ мс, частота 100 Гц)

Процесс ликвидации перемежающегося короткого замыкания при частоте 100 Гц аналогичен процессу ликвидации «глухого» короткого замыкания. Наблюдается работа силового ключа в резистивной области (график 1), а также значительный нагрев его кристалла (график 5). Аварийные токи короткого

замыкания ограничены и не превышают номинальных значений (график 4). Кроме того, наблюдается кратковременная нормальная работа транзисторного АЗК в течении 5 мс, из-за чего срабатывание защиты транзисторного АЗК происходит за время большее, чем при возникновении «глухого» короткого замыкания.

Следует отметить, что время ограничения аварийных токов при повторном коротком замыкании меньше, чем время ограничения при первом замыкании. Это объясняется наличием остаточного сигнала в схеме управления транзисторным АЗК, сигнализирующем о начале повторного короткого замыкания, что позволяет избежать значительного перегрева кристалла силового ключа (график 5).

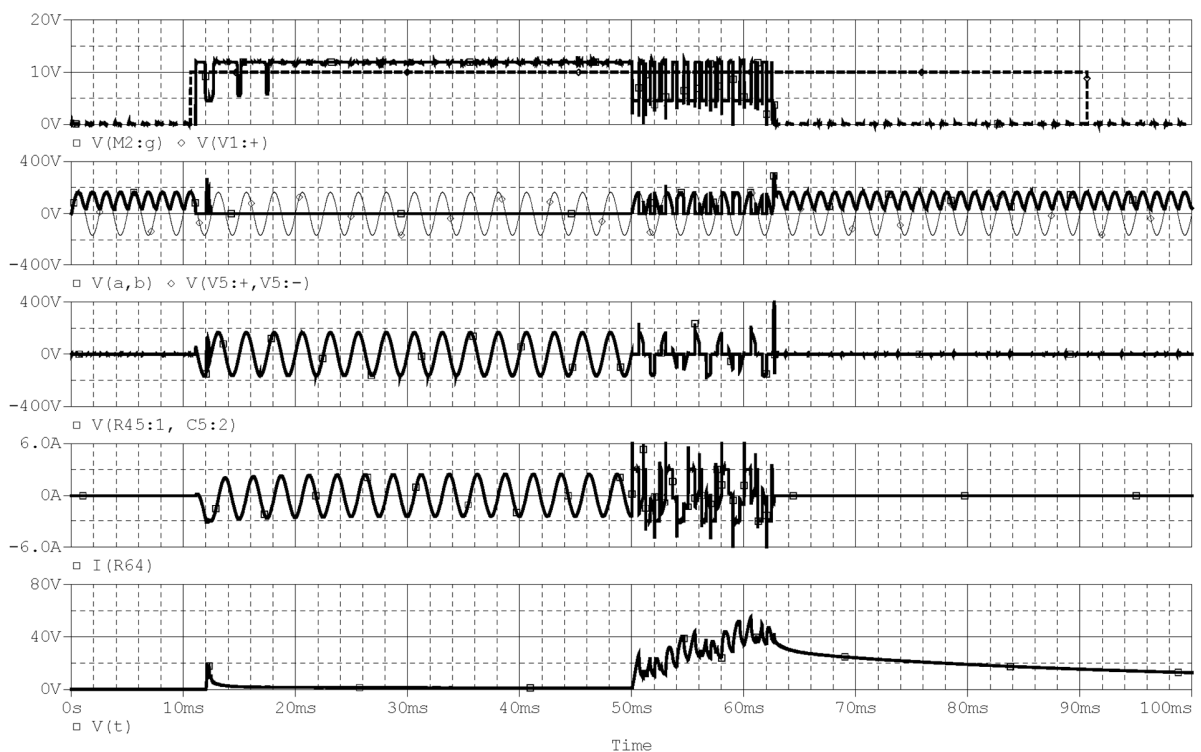


Рисунок 2.21 Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации RL нагрузки при возникновении перемежающегося короткого замыкания ($t=50$ мс, частота 1000 Гц)

При частоте перемежающегося короткого замыкания равной 1000 Гц наблюдается около 12 промежутков нормальной работы транзисторного АЗК продолжительностью не более 1 мс. Токи короткого замыкания ограничены по

амплитуде величиной 3 А (номинальный ток нагрузки). По истечении 12 мс воздействия перемежающегося короткого замыкания, транзисторный АЗК отключается (до снятия сигнала управления). Следует отметить, что после отключения транзисторного АЗК, несмотря на работу силового ключа в резистивной области, температура его кристалла (график 5) также находится в пределах нормы. Увеличение времени реакции АЗК объясняется наличием большего (по сравнению с частотой 100 Гц) количества промежутков нормальной работы транзисторного АЗК.

2.2 Экспериментальное моделирование процессов коммутации нагрузок

Предлагаемый способ ликвидации параллельного дугового разряда, возникающего при перемежающемся коротком замыкании, был реализован в прототипе транзисторного аппарата защиты и коммутации, внешний вид которого показан на рисунке 2.22.

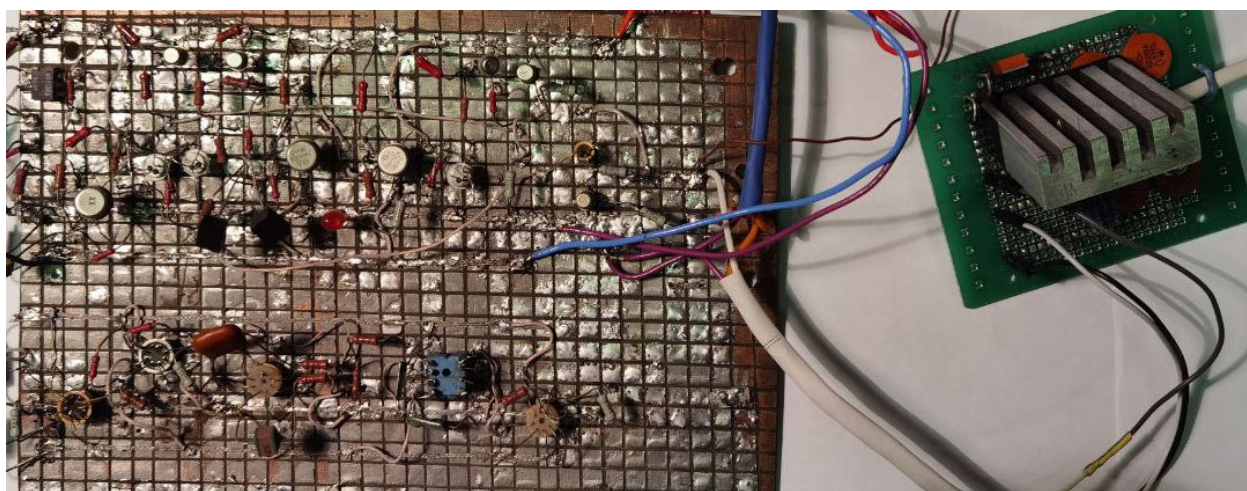


Рисунок 2.22 Прототип транзисторного автомата защиты и коммутации

Лабораторные испытания прототипа транзисторного АЗК были проведены на специально спроектированном стенде имитации параллельного перемежающегося короткого замыкания, функциональная схема которого представлена на

рисунке 2.23. Параллельное перемежающееся короткое замыкание на частотах до 200 Гц осуществляется контактами коммутационного реле типа ТКЕ53. Периодическое короткое замыкание с частотой от 200 Гц до 2 кГц из-за большой инерционности электромеханического реле осуществляется силовым транзисторным ключом, подключенного по схеме, позволяющей проводить переменный ток. Переключение между двумя способами реализации параллельного короткого замыкания происходит с помощью однополюсного переключателя SA1.

Частота коммутации силового транзистора задается внешним источником сигнала. Транзистор VT1 усиливает входной сигнал до величины, достаточной для открывания силового транзистора VT4. Резисторы R3, R4 выполняют роль делителя напряжения, формируя управляющий сигнал на затвор VT4 с необходимым напряжением. Транзистор VT3 при отсутствии тактового сигнала закорачивает выход входного транзистора, таким образом силовой транзистор находится в закрытом состоянии. При поступлении сигнала от генератора тактового импульса транзистор VT2 открывается, ток минует базу транзистора VT3, он закрывается и усиленный сигнал от генератора тактового импульса поступает на затвор VT4. Сигнал с генератора тактового импульса также запускает развертку запоминающего осциллографа.

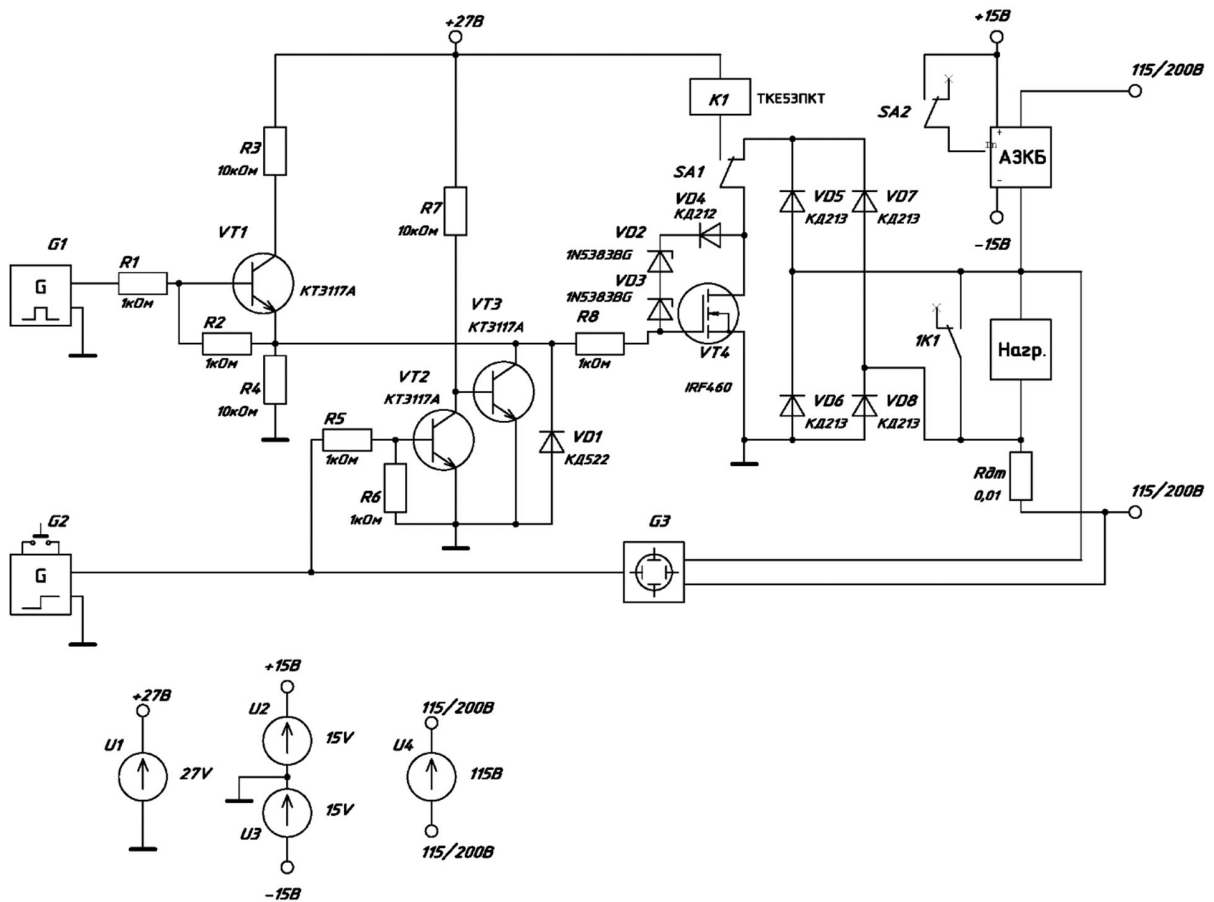


Рисунок 2.23 Функциональная схема лабораторного макета для испытаний полупроводникового АЗК в режиме ликвидации параллельного перемежающегося короткого замыкания

Испытания лабораторного макета полупроводникового АЗК проводятся с резистивной нагрузкой. На рисунке 2.24 приведены осциллограммы тока нагрузки и напряжения на затворе СТК при ликвидации перемежающегося короткого замыкания с частотой 50 Гц, созданного параллельно резистивной нагрузке. Частота переменного тока 50 Гц, напряжение 55 В.

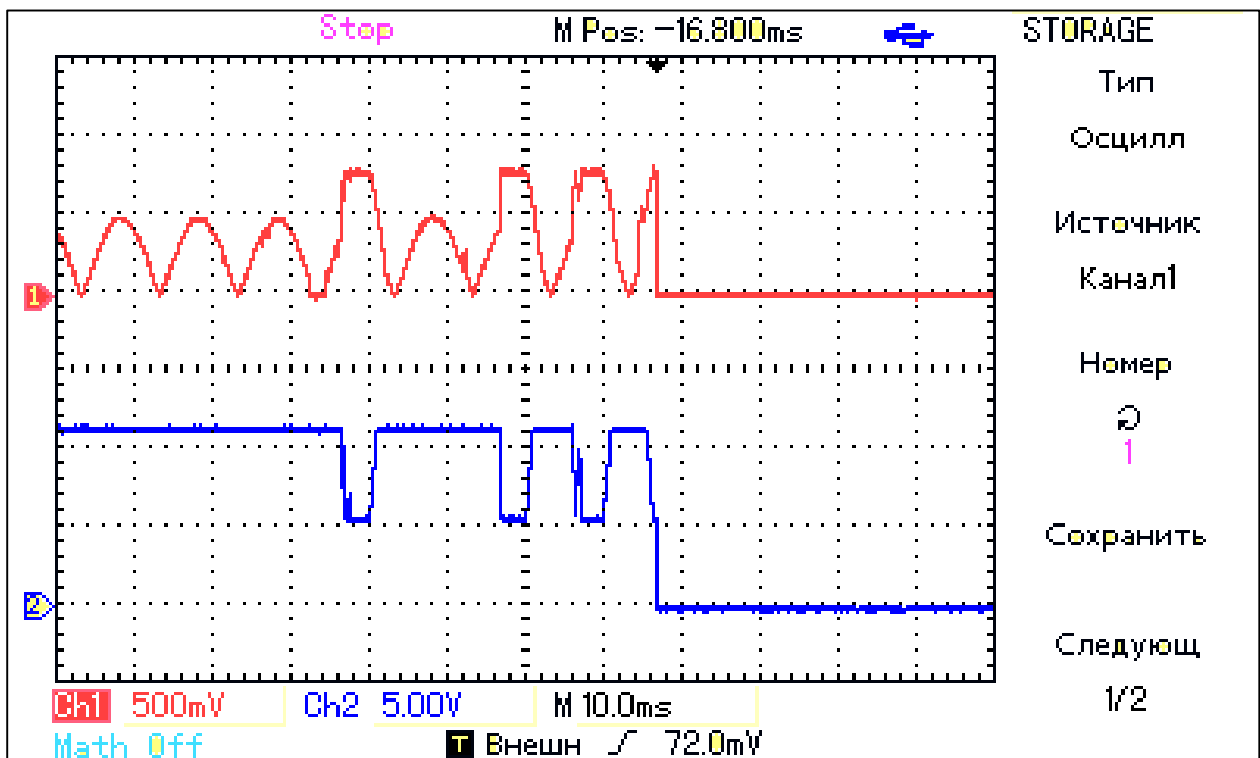


Рисунок 2.24 Осциллограммы тока нагрузки и напряжения на затворе СТК при ликвидации перемежающегося короткого замыкания (R-нагрузка, частота КЗ – 50 Гц)

На верхней осциллограмме наблюдается знакопостоянный сигнал тока нагрузки, форма которого объясняется расположением датчика тока в структуре силового транзисторного ключа. Следует отметить, что амплитуда тока нагрузки при возникновении короткого замыкания ограничена до уровня неаварийных токов. На нижней осциллограмме отображено напряжение на затворе СТК, наблюдается его снижение до 5 В при возникновении короткого замыкания, что связано с необходимостью выведения СТК в активную область для ограничения аварийных токов нагрузки. Общее время ликвидации перемежающегося КЗ составляет 20 мс, от момента начала второго короткого замыкания.

2.3 Вывод

1. Предложен метод ликвидации аварийного дугового разряда параллельного типа, основанный на способности транзисторных аппаратов защиты к амплитудному ограничению тока.

2. Представлены функциональная схема и имитационная компьютерная модель модернизированного транзисторного аппарата защиты и коммутации электросетей для переменного тока с функцией ограничения тока нагрузки, состоящий из следующих блоков:

- блок гальванической развязки сигнала управления
- блок управления и защиты
- силовой транзисторный ключ
- блок ограничения напряжения
- блок организации отключения СТК, позволяющий снизить тепловыделение на силовом ключе в десятки раз
- блок ограничения тока с постоянным уровнем ограничения, который обеспечивает защиту нагрузки от протекания переходных токов, от возникающего перемежающегося короткого замыкания.

3. Установлено, что применение регулируемого уровня ограничения тока нагрузки в разрабатываемом устройстве не представляется возможным ввиду существенного влияния схемы на работу блока амплитудного ограничения переходных токов.

4. Показано, что включение в состав транзисторного АЗК блока организации отключения индуктивно-резистивной нагрузки существенно снижает перенапряжение в цепи и температуру кристалла силового ключа при коммутации. Время включения и отключения АЗК при коммутации номинального тока

увеличивается не более чем на 2 мс, при этом работа блока организации отключения не влияет на время срабатывания АЗК при переходных и аварийных токах.

5. С помощью имитационного компьютерного моделирования подтверждена работоспособность разработанного транзисторного АЗК по следующим пунктам:

- коммутация резистивных, индуктивно-резистивных, смешанных типов нагрузок, а также нагрузок типа «вторичный источник питания» в щадящем для силового транзисторного ключа режиме и без искажения формы кривой тока;
- коммутация указанных типов нагрузок при протекании переходных токов с их амплитудным ограничением;
- защита электросетей от аварийного дугового разряда параллельного типа существующим набором защитных цепей без реализации дополнительных блоков.

6. С целью экспериментальной проверки работоспособности предлагаемого метода ликвидации параллельной дуги был построен прототип транзисторного автомата защиты и коммутации переменного тока и лабораторный стенд, по реализации перемежающегося короткого замыкания различной частоты.

7. Проведено экспериментальное исследование предлагаемого метода ликвидации параллельной дуги, результаты которого подтвердили способность транзисторного АЗК ликвидировать параллельную дугу с помощью встроенной функции ограничения токовых перегрузок.

Глава 3 О свойствах последовательного аварийного дугового разряда в сетях переменного тока

Для изучения особенностей горения дуги, характерных её признаках, а также с целью выявления параметров и условий, влияющих на зажигание дугового разряда необходимо дать определение дуги и кратко описать основные физические процессы, проходящие в ней.

3.1 Дуговой разряд, основные физические процессы, протекающие в дуге, тепловое и световое излучение

Электрический дуговой разряд является одним из видов разряда в газах или парах, который визуально представляет собой светящийся канал. Характеризуется большой плотностью тока, падением напряжения, высокой температурой, интенсивным тепловыделением и свечением. Горящую электрическую дугу можно разделить на 3 области: катодную, анодную и ствол дуги, который заполнен плазмой [31, стр.27].

Возникновение дугового разряда происходит в катодной области за счет неплотного соприкосновения электродов, в результате чего электрический ток протекает через небольшое сечение и вызывает нагрев электродов. В катоде за счет нагрева металла происходит увеличение кинетической энергии электронов, что вызывает их термоэлектронную эмиссию с поверхности материала. Для выхода в окружающее пространство электронам необходимо затратить энергию (работу выхода) на преодоление действия положительного барьера кристаллической решетки. Работа выхода зависит от рода металла, из которых сделаны электроды, и для каждого металла является постоянной величиной (таблица 2). С ростом температуры, энергия электронов увеличивается, что приводит к росту термоэлектронной эмиссии с поверхности катода.

Таблица 2 Характеристика некоторых материалов

Вещество	Энергия (потенциал), эВ		Работа выхода, эВ
	возбуждения	ионизации	
Алюминий	–	6,00 (18,80)	4,25
Вольфрам	–	7,87 (17,70)	4,54
Железо	–	7,86 (16,00)	4,31
Медь	1,40	7,72 (20,30)	4,40
Оксид меди	–	–	4,20
Никель	–	7,61 (18,00)	4,50
Олово	–	7,33 (14,60)	4,38
Ртуть	4,70 (6,67)	10,43 (19,00)	4,53
Серебро	–	7,57 (21,50)	4,3
Цинк	4,02 (5,77)	9,39 (18,00)	4,24
Азот (атом)	–	14,55 (29,60)	–
Азот (молекула)	6,30	15,80 (–)	–
Водород (атом)	10,20	13,60 (–)	–
Водород (молекула)	7,00	15,40 (–)	–
Кислород (атом)	7,90	13,62 (35,00)	–
Кислород (молекула)	7,90	12,50 (–)	–
Элегаз	8,20	15,80 (–)	–

В процессе горения дуги около катодной области располагаются положительные ионы среды, которые увеличивает скорость движения выходящих с поверхности электронов и устремляют их в ствол дуги. Дуговой разряд истекает только с части поверхности катода, которая называется катодным пятном. При превышении тока дуги критического значения катодное пятно может разделиться на несколько частей.

В процессе горения дуги на поверхности катода наблюдается установление определенной стабильной температуры, которая обусловлена равенством между

подводимой (за счет нейтрализации положительных ионов среды) и отводимой энергиями (за счет термоэлектронной эмиссии электронов, испарения металла с поверхности и переноса тепла на присоединительные провода).

Известны случаи возникновения дугового разряда не за счет термоэлектронной эмиссии, а за счет эмиссии электронов под действием электрического поля сильной напряженности около катода. Однако, установлено [31, стр.187], что плотность атмосферного воздуха при температуре катода недостаточна, для образования дугового разряда таким способом, поэтому данная причина возникновения дугового разряда в работе не рассматривается.

В анодной области дугового разряда происходит прием потоков электронов, идущих из ствола дуги. Под действием бомбардировки электронов поверхность анода разогревается, происходит термоэлектронная эмиссия электронов, но под действием внешнего электрического поля они возвращаются на поверхность анода и не участвуют в поддержании дугового разряда. В анодной области отсутствуют положительные ионы, поэтому образуется избыток электронов, создающий падение напряжения в дуговом разряде от 5 В до 10 В в зависимости от материала анода.

Роль анода в дуговом разряде является пассивной, высокая температура анода несущественна для образования и существования дуги. Баланс энергии на поверхности анода пятна складывается из подводимой (кинетическая энергия удара электронов, и энергия, поступающая из ствола дуги с помощью теплопроводности, конвекции и излучения) и отводимой энергии (плавление и испарение материала анода, нагрев зоны контактирования и отводимая теплопроводностью энергия в присоединительные провода).

В плазменном столбе под действием внешнего электрического поля непрерывно перемещаются следующие заряженные частицы: электроны (от катодной области к анодной) и положительные ионы или молекулы среды (от анодной области к катодной). Подвижность электронов в 1000 раз выше

подвижности положительных ионов среды, поэтому практически весь электрический ток создается электронами. Таким образом, плазменный столб дуги по физическим свойствам является проводником, проводимость которого близка к проводимости металла.

В процессе горения плазменного столба дуги за счет соударения электронов с нейтральными атомами и молекулами среды происходит ионизация или возбуждение последних (в зависимости от энергии электрона). Ионизированные атомы (молекулы) среды участвуют в создании плазмы. Возбужденные атомы (молекулы) среды остаются в таком состоянии непродолжительное время (порядка 10^{-8} с), после чего атомы (молекулы) возвращаются в нейтральное состояние с выделением освободившейся энергии в виде фотона, которые формируют свечение дугового разряда.

3.2 Процесс горения последовательного дугового разряда переменного тока

Исследование процесса горения дугового разряда переменного тока проводилось на специальном стенде, схематическое изображение которого представлено на рисунке 3.1. Формирование дугового разряда производится между двумя шаровыми электродами, которые в начальный момент времени находятся в соприкосновении. С целью исследования свойств последовательного дугового разряда выполнены 6 пар электродов из различных токопроводящих материалов, встречающихся в авиационных конструкциях: медь (марки ДШГНП), алюминий (марки АК-4) и сталь (марки 30ХГСА). Экспериментальное исследование проводилось с электродами всех типов, а их разведение осуществлялось с помощью микрометрического винта.

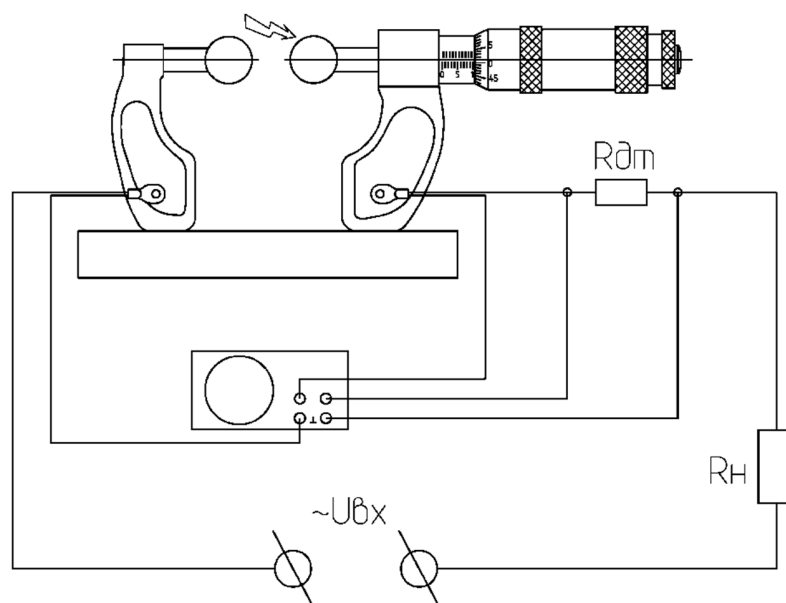


Рисунок 3.1 Схематичное изображение стенда по зажиганию последовательного дугового разряда

Процесс горения последовательного дугового разряда можно разделить на 3 стадии: зажигание дуги, устойчивое горение (либо в резистивной, либо в плазменной фазе) и гашение дуги.

3.2.1 Зажигание дуги

При расхождении электродов контактное нажатие между ними постепенно снижается, площадь их соприкосновения уменьшается, в результате чего увеличивается плотность тока, проходящего через пятно контакта и температура электродов. По мере дальнейшего движения электродов температура пятна контакта возрастает и к моменту их фактического расхождения достигает температуры плавления металла электродов. При этом цепь остается замкнутой, форма тока не меняется, возрастает падение напряжения между электродами. На рисунке 3.2 представлены осциллограммы тока и напряжения в исправной цепи, на рисунке 3.3 – цепи с увеличенным расстоянием между электродами в сети с источником переменного напряжения 55 В и частотой 50 Гц.

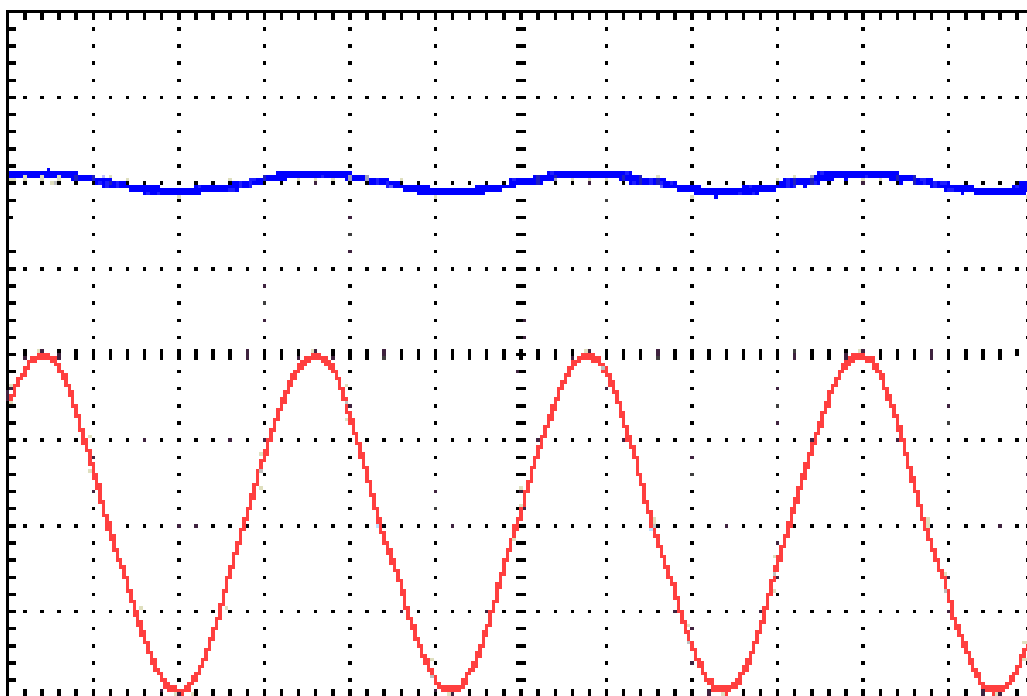


Рисунок 3.2 Осциллограммы синусоидального тока (нижня) и напряжения (верхняя) на медных электродах в исправной цепи.

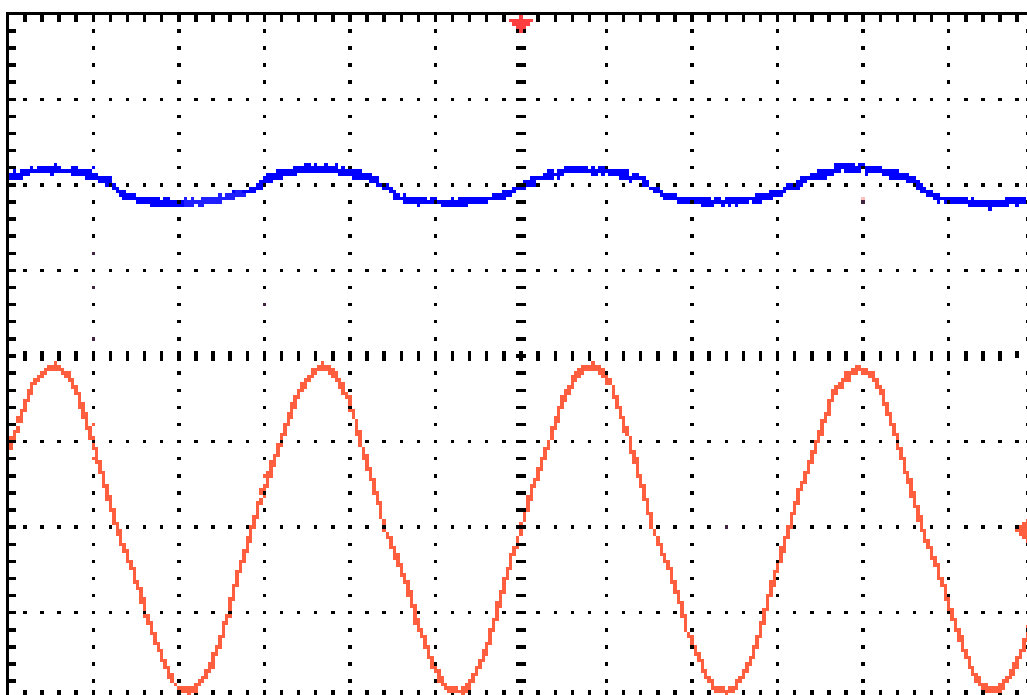


Рисунок 3.3 Осциллограммы синусоидального тока (нижня) и напряжения (верхняя) на медных электродах в цепи с увеличенным расстоянием между электродами

На рисунке 3.2 наблюдается синусоидальный ток нагрузки с амплитудой равной 6 А, амплитуда падения напряжения на сомкнутых медных электродах не превышает 2 В. На рисунке 3.3 наблюдается повышение падения напряжения между медными электродами до 5 В, связанное с увеличением расстояния между ними, при этом ток нагрузки не изменился.

Осциллограммы напряжения сняты непосредственно между электродами, а осциллограмма тока получена с безиндуктивного резистивного датчика тока сопротивлением 0,16 Ом, подключенного последовательно. Осциллограммы получены на цифровом запоминающем осциллографе с запуском по сигналу с канала тока.

3.2.2 Резистивная фаза горения дуги

При увеличении расстояния между электродами до величины в несколько микрометров образуется мостик из жидкого металла, форма которого в начале образования является бочкообразной, а по мере расхождения электродов выражается в седловину. Передача тока в цепи происходит не за счет соприкосновения электродов, а за счет образования мостика между ними из расплавленного проводящего материала. Осциллограммы тока и напряжения между электродами находятся в одной фазе (рисунок 3.4), соответствуют осциллограммам протекания тока через участок цепи с высоким сопротивлением, поэтому данное состояние цепи называется резистивная фаза горения последовательного дугового разряда.

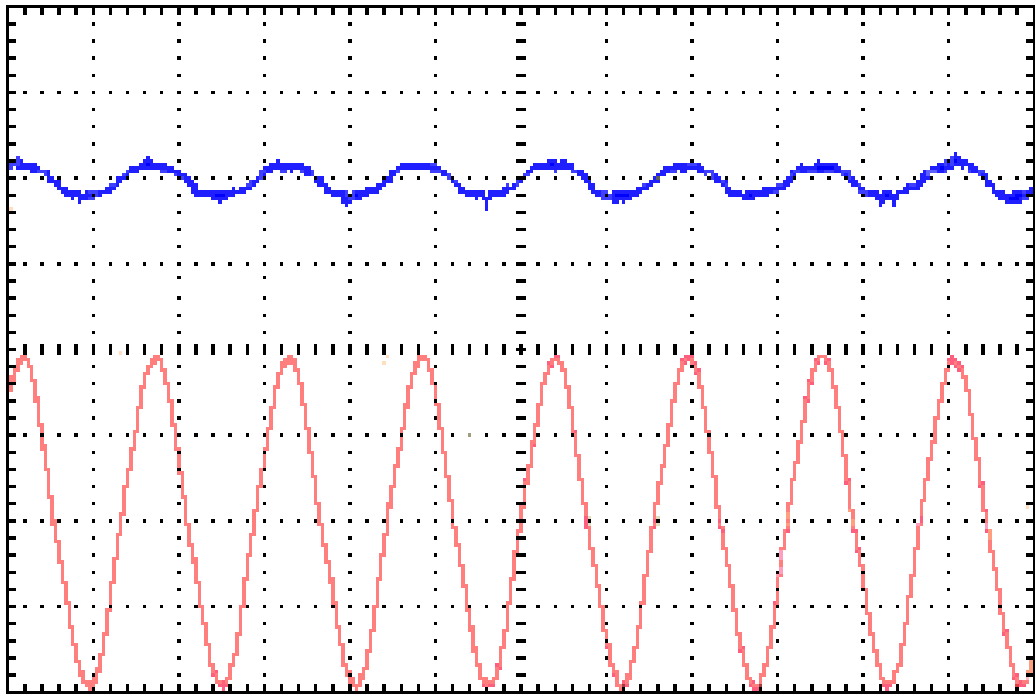


Рисунок 3.4 Осциллограммы синусоидального тока (нижняя) и напряжения (верхняя) на медных электродах при резистивной фазе горения.

На рисунке 3.4 наблюдается синусоидальный ток нагрузки с амплитудой равной 6 А, амплитуда падения напряжения между медными электродами увеличилась незначительно и составляет порядка 7 В. В ряде случаев за счет воздействия внешних условий на жидкий мостик из металла между электродами в сигналах тока и напряжения могут наблюдаться высокочастотные шумы с хаотическим изменением параметров, однако это явление спонтанное и для некоторых материалов электродов полностью отсутствует (соединение медного и стального электродов).

3.2.3 Плазменная фаза горения дуги

Мостик из жидкого металла между электродами при резистивной фазе горения дуги, по форме напоминающем седловину, имеет наименьшее сопротивление по центру, поэтому в этом районе мостика наблюдается наибольшая плотность тока, что приводит к интенсивному разогреву седловины вплоть до

температуры, превышающей температуру кипения металла. Под воздействием данной температуры в центре седловины происходит разрушения жидкого моста между электродами, начинается термоэлектронная эмиссия электронов с поверхности металла. Под действием внешнего электрического поля электроны ускоряются, часть из них соударяются с нейтральными атомами среды, вызывая их ударную ионизацию. В межэлектродном канале возникает большое количество свободных электронов и ионов, которые образуют ионизированный канал (плазму) и начинается плазменная фаза горения дуги. Осциллограммы тока и напряжения между медными электродами при переходе резистивной фазы в плазменную изображены на рисунке 3.5.

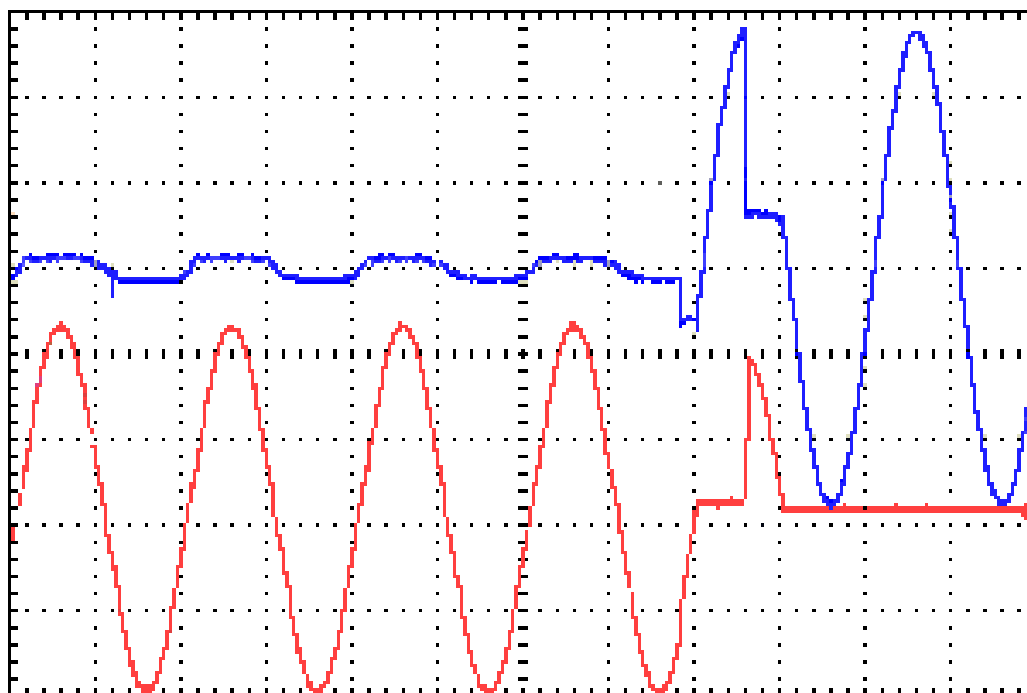


Рисунок 3.5 Осциллограммы синусоидального тока (нижняя) и напряжения (верхняя) на медных электродах в момент перехода резистивной фазы горения дуги в плазменную.

На рисунке 3.5 проиллюстрированы осциллограммы тока и напряжения при резистивной фазе горения дуги (период №1-4) и момент возникновения плазменной фазы горения дуги (период №5). Напряжение зажигания плазменного столба,

согласно осциллограмме, составляет 56 В падение напряжение на межэлектродном промежутке возросло до 12 В гашение плазмы произошло после одного полупериода. В эксперименте использовался источник переменного напряжения 55 В с частотой 50 Гц.

Возникновение плазменной фазы горения последовательного дугового разряда возможно без предварительного горения дуги в резистивной фазе. С целью демонстрации данного факта был проведен эксперимент, в котором изначальное положение электродов соответствовало разомкнутой цепи, при этом происходило их плавное сближение. Результаты эксперимента показаны на рисунке 3.6.

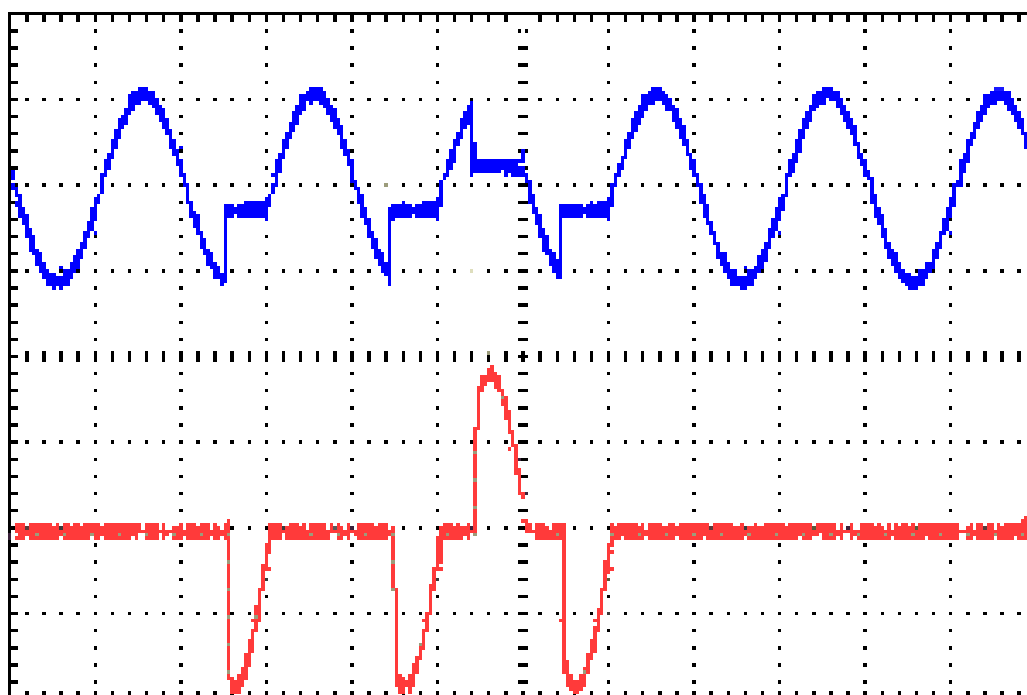


Рисунок 3.6 Осциллограммы синусоидального тока (нижняя) и напряжения (верхняя) на медных электродах при возникновении плазменной фазы горения дуги (без предварительного горения в резистивной фазе)

На рисунке 3.6 отчетливо наблюдается отсутствие тока в цепи в начальный момент времени и возникновение плазменной фазы горения дуги без предварительного горения дуги в резистивной фазе. Осциллограммы выполнялись

для безиндуктивной сети с резистивной нагрузкой и источником переменного напряжения 55 В с частотой 50 Гц.

На рисунке 3.6 также отчетливо наблюдается выпрямительный эффект при плазменном горении дуги (период №2): при отрицательных полуволнах напряжения ток в цепи присутствует, при положительных – ток равен нулю. Выпрямительный эффект носит временный характер, наблюдается только на начальном этапе плазменной фазы горения дуги, постепенно ослабевает по мере прогрева плазменного столба и объясняется наличием на поверхности металлов в межэлектродном промежутке окисей меди (CuO), которые по своим электрическим свойствам соответствуют полупроводникам. Нарушение симметричного вида кривой тока отчётливее всего наблюдаются в тех случаях, когда электроды выполнены из различных материалов. Данное явление объясняется различием электродов в температуре и термоэмиссионных свойствах.

Явление несимметричного протекания тока носит спонтанный характер, довольно часто возникновение плазменной фазы горения дуги не сопровождается проявлением выпрямительного эффекта, однако для него характерно наличие постоянной составляющей тока, которая может быть использована как однозначный признак наличия последовательной дуги.

На рисунке 3.7 приведены осциллограммы тока и напряжения для устойчивой плазменной фазы горения последовательной дуги в безиндуктивной сети с резистивной нагрузкой и при использовании источника переменного напряжения 55 В с частотой 50 Гц.

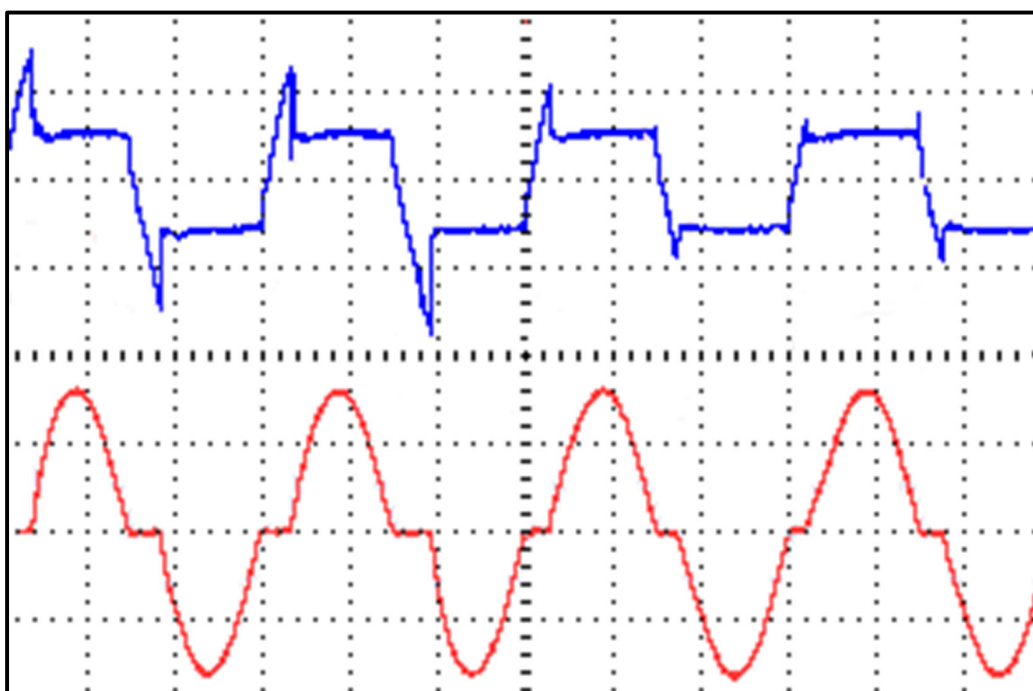


Рисунок 3.7 Осциллограммы синусоидального тока (нижняя) и напряжения (верхняя) на медных электродах, характерные для устойчивой плазменной фазы горения дуги

Устойчивая плазменная фаза горения дуги сопровождается её гашением в каждом полупериоде незадолго до перехода через ноль осциллограммы тока. При уменьшении силы тока, протекающего через дуговой разряд, падение напряжения на дуге медленно возрастает на 1-3 В (в зависимости от материала электродов) и незадолго до прохождения тока через ноль повышается до значения, которое называется потенциалом гашения дуги. Гашение столба дуги возникает вследствие сочетания двух факторов: увеличения падения напряжения на участке горения дуги и уменьшения значения переменного напряжения внешнего источника питания. В момент, когда потенциал гашения дуги превышает величину напряжения источника питания происходит погасание дуги.

После прохождения тока дуги через ноль наблюдается отсутствие тока в цепи и возрастание напряжения на межэлектродном участке, которое вызвано отсутствием плазменного столба. Возрастание напряжения происходит до значения

потенциала зажигания дуги. Повторное зажигание дуги приводит к возникновению дугового тока с противоположным направлением.

Следует отметить, что на осциллограмме переменного тока плазменной фазы горения дуги при резистивной нагрузке наблюдается изменение амплитуды напряжения зажигания и гашения дуги с течением времени. Данные изменения вызваны рядом факторов:

- постепенным разогреванием электродов,
- изменением условий их охлаждения,
- появлением дополнительных окисных пленок на электродах,
- незначительным изменением расстояния между электродами.

Анализируя процесс плазменной фазы горения дуги, следует выделить следующие особенности процесса:

- наличие нулевых участков в осциллограмме тока («плечи» тока), иллюстрирующие периодическое исчезновение плазменного столба дуги на время его деионизации,
- наличие практически горизонтальных участков в осциллограмме напряжения, отражающие действие тепловой обратной связи в столбе дуги и малую тепловую инерционность процессов,
- наличие пиков напряжения зажигания и гашения дуги,
- заметная разница в напряжениях зажигания и гашения дуги, связанные с гистерезисом её вольт - амперной характеристики;
- изменение значений напряжения зажигания и гашения дуги в процессе её горения.

Устойчивое горение последовательного дугового разряда может сопровождаться хаотическим чередованием плазменной и резистивной фаз горения дуги. На рисунке 3.8 представлены осциллограммы тока и напряжения данного процесса.

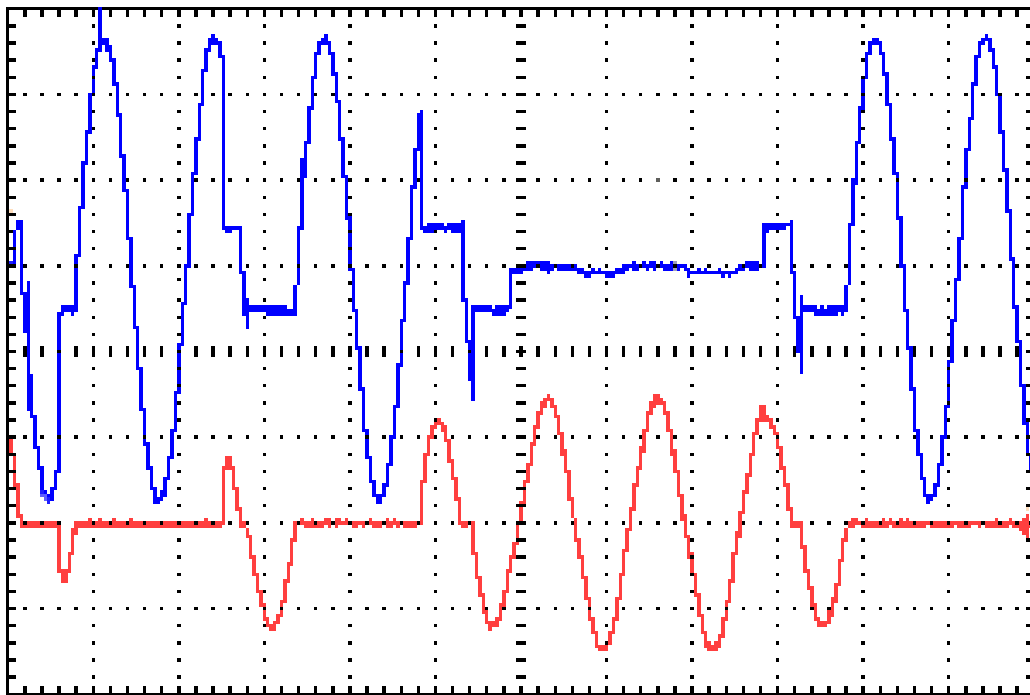


Рисунок 3.8 Осциллограммы синусоидального тока (нижняя) и напряжения (верхняя) хаотичного изменения фаз горения дуги.

На осциллограммах наблюдается следующая смена фаз: плазменная фаза (1-й период), разрыв цепи (2-й период), плазменная фаза (3-й период), разрыв цепи (4-й период), плазменная фаза (5-й период), резистивная фаза (6-й и 7-й период), плазменная фаза (8-й период), разрыв цепи (9-й и последующие периоды). В качестве источника использовался источник переменного напряжения 55 В с частотой 50 Гц. Длительность процессов, изображенных на осциллограммах, составляет 24 мс.

Спонтанное чередование фаз горения дуги может быть вызвано несколькими причинами: недостаточный прогрев электродов, и как следствие неустойчивая термоэлектронная эмиссия электронов с поверхности металлов; воздействие внешней окружающей среды; наличие вибрации дугового промежутка.

Кроме того, при устойчивой плазменной фазы горения дуги может наблюдаться периодическое искрообразование (рисунок 3.9), вызванное снижением подводимой энергии к электродам, которой достаточно для совершения

работы выхода электронов с поверхности металла, но недостаточно для образования большого количества электронов, ионов из атомов среды.

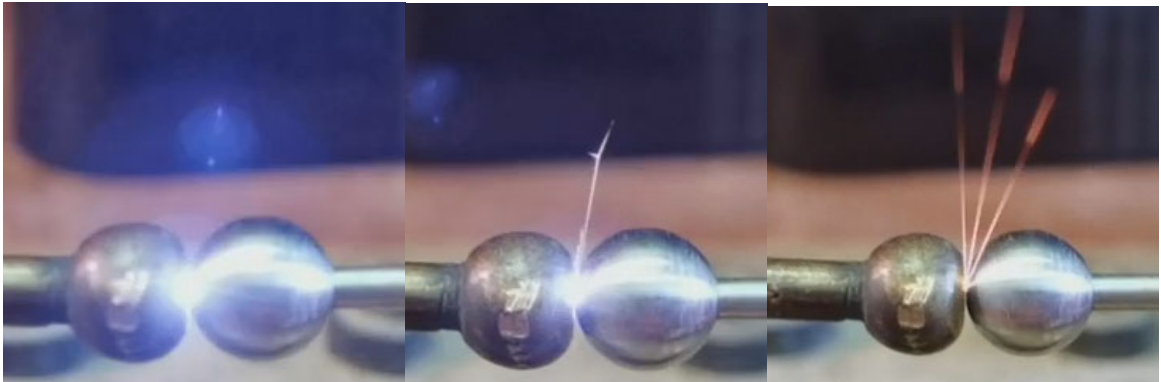


Рисунок 3.9 Эпизодическое возникновение искрового разряда при плазменной фазе горения дуги

Возникновение искрового разряда дополнительно разогревает электроды и увеличивает интенсивность термоэлектронной эмиссии электронов с их поверхности, которые в свою очередь дополнительно ионизируют атомы среды и способствуют возникновению плазменного столба.

3.2.4 Гашение дуги

Процесс гашения дуги можно описать следующим образом: по мере расхождения электродов и удлинения плазменного ствола дуги, интенсивность деионизации атомов среды становится выше, чем ионизации. Количество заряженных частиц в канале ствола дуги уменьшается, снижается проводимость канала, ток в цепи и температура дуги падают. Происходит снижение интенсивности термоэлектронной эмиссии электронов с катода, что приводит к еще большей деионизации атомов среды, термоионизация прекращается, выделяемая энергия в стволе уменьшается.

По условиям гашения дуговые разряды различают на несколько типов:

- короткие, гашение которых обуславливается в основном процессами, происходящими на электродах;
- длинные (плазменные), гашение которых обуславливается в основном процессами, происходящими в створе дуги.

3.3 Факторы, влияющие на горение последовательного дугового разряда переменного тока

В процессе проведения экспериментов выявлены следующие факторы, облегчающие зажигание дугового разряда.

- наличие загрязнений и окисей металла на поверхности электродов (работа выхода электронов в данных примесях меньше, чем работа выхода у чистого материала электрода, следовательно, энергии для начала термоэлектронной эмиссии требуется меньше);

- высокая температура катода (облегчает повторное зажигание дуги вследствие повышенной эмиссии электронов и повышения степени термической ионизации окружающего газа);

- высокая температура газа (газ при высокой температуре обладает меньшей плотностью, что увеличивает среднюю длину пробега заряженных частиц, следовательно, увеличивается энергетика каждой заряженной частицы, что приводит к увеличению вероятности ионизации газа);

- наличие остаточной ионизации газа (большая часть разрядного промежутка представляет собой хорошо проводящую плазму, в которой электроны начинают отталкиваться от вновь образованного катода и относиться в сторону; между вновь образованным катодом и оставшимися ионами среды образуется разность потенциалов, облегчающая пробой среды).

Особенности зажигания и горения дуги также зависят от параметров внешней среды и параметров электросети. Рассмотрим подробнее данные факторы.

3.3.1 Параметры электрической цепи

3.3.1.1 Электрические параметры цепи питания

Характерная форма напряжения последовательного дугового разряда переменного тока зависит от амплитуды и частоты силы тока.

Возникновение последовательной дуги при небольших токах (несколько десятков ампер) сопровождается возникновением напряжения на дуговом участке с характерными пиками зажигания и гашения дуги (рисунок 3.7) [109]. При увеличении тока в цепи до нескольких сотен ампер форма напряжения дугового разряда изменяется, пика напряжения зажигания и гашения дуги сглаживаются (рисунок 3.10).

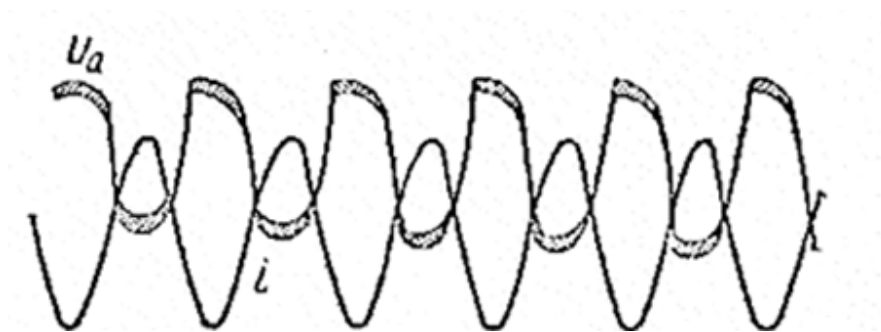


Рисунок 3.10 Форма напряжения и тока последовательной дуги переменного тока при высоких токах нагрузки.

При повышении частоты тока (до величины, когда скорость изменения тока значительно превышает скорость тепловой инерции среды) время деионизации канала снижается, что приводит к уменьшению времени непрерывного горения дугового разряда. Форма тока и напряжения при этом аналогична форме тока и напряжения на участке цепи с активным сопротивлением (рисунок 3.11) [109].

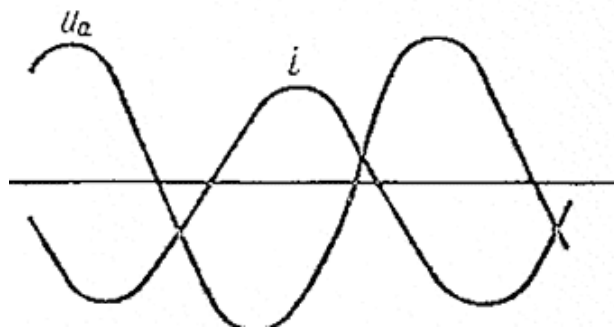


Рисунок 3.11 Форма напряжения и тока последовательной дуги переменного тока высокой частоты.

Исследование свойств последовательного дугового разряда проводилось для нескольких цепей переменного тока: сеть с напряжением 40 В и промышленной частотой 50 Гц и авиационная сеть переменного тока с напряжением 115/200 В и частотой 400 Гц. Осциллограммы тока и напряжения горения последовательной дуги в обеих сетях переменного тока представлены на рисунках 3.12 и 3.13.

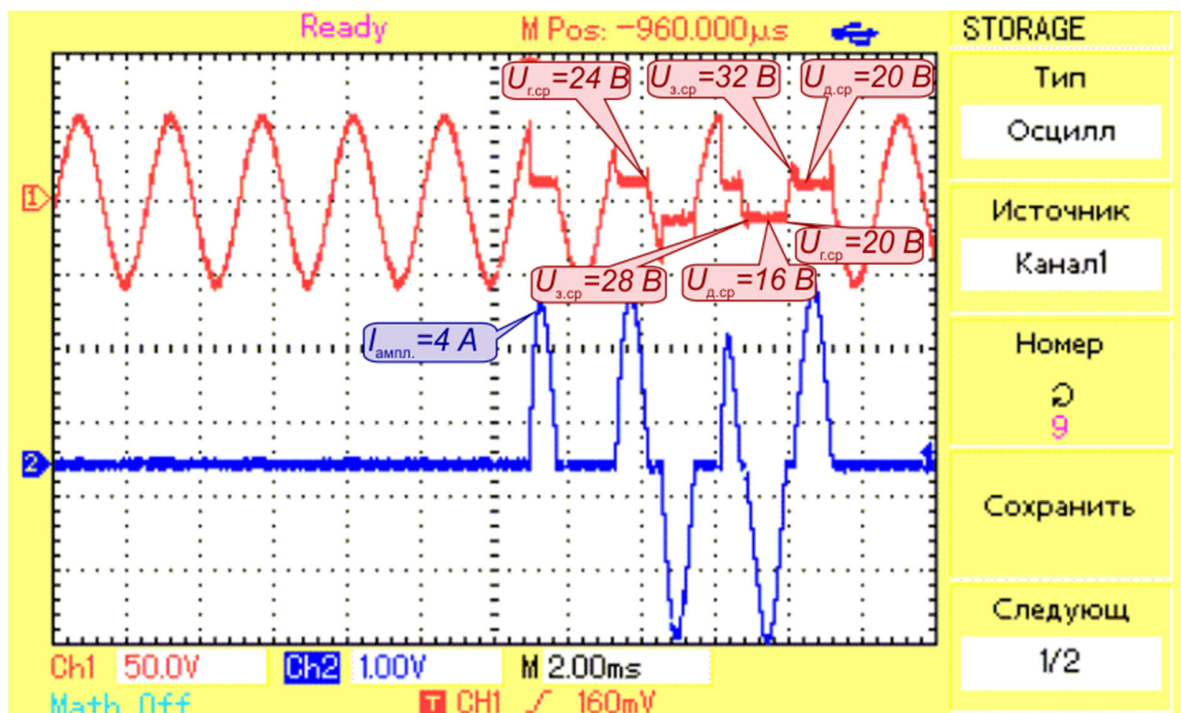


Рисунок 3.12 Осциллограмма тока и напряжения последовательной дуги переменного тока 115/200 В с частотой 400 Гц (электроды: медь-алюминий)

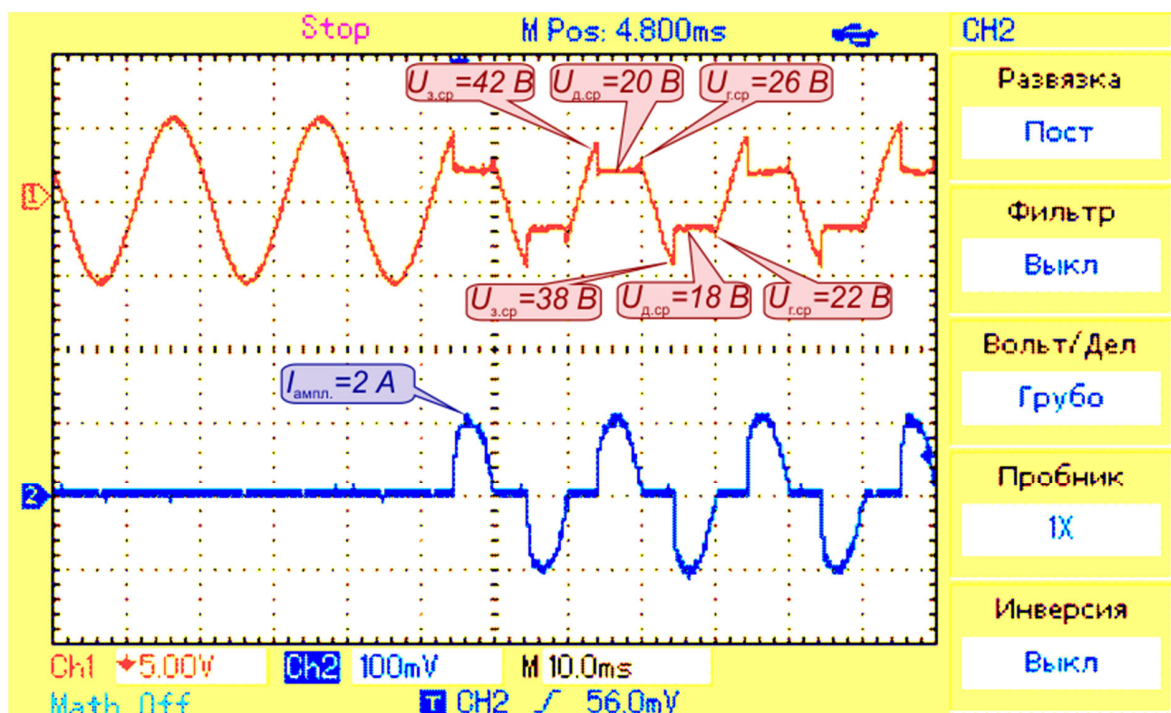


Рисунок 3.13 Осциллограмма тока и напряжения последовательной дуги переменного тока 55 В с частотой 50 Гц (электроды: медь-алюминий)

На осциллограммах можно заметить, что падение напряжения на участке горения плазменного столба для обеих частот одинаковое, что объясняется неизменными материалами электродов. При этом с ростом частоты снижается напряжение гашения дуги (с 26 В при 50 Гц до 24 В при 400 Гц), что связано со стремлением формы напряжения к синусоиде (рисунок 3.11). Снижение напряжения зажигания дуги с ростом частоты объясняется увеличением тока нагрузки и не зависит от частоты тока. Разница в амплитудах зажигания дуги, гашения дуги и падения напряжения при положительной и отрицательной полуволне объясняется различием в материалах электродов.

Следует отметить, что изменение параметров напряжения горения последовательной дуги в сетях переменного тока носит незначительный характер при увеличении частоты с 50 Гц до 400 Гц. Таким образом, в дальнейших экспериментах по исследованию свойств последовательного дугового разряда будет применяться источник переменного тока с напряжением 55 В и частотой

50 Гц, поскольку он обладает лучшими перегрузочными и регулировочными характеристиками.

3.3.1.2 Тип нагрузки

Все вышеуказанные осциллограммы тока и напряжения дуги были приведены для цепи с резистивной нагрузкой. Последовательное включение в состав резистивной нагрузки индуктивности приводит к накоплению электромагнитной энергии, что в свою очередь увеличивает амплитуду широкополосного хаотического шума, облегчает поддержание горения последовательной дуги и увеличивает продолжительность горения плазменного столба. При этом значительно увеличивается напряжение гашения дуги (рисунок 3.14 и 3.15). Следует отметить, что при неограниченном увеличении индуктивности цепи можно получить состояние, при котором плазменный столб последовательного дугового разряда переменного тока будет гореть не прерываясь.

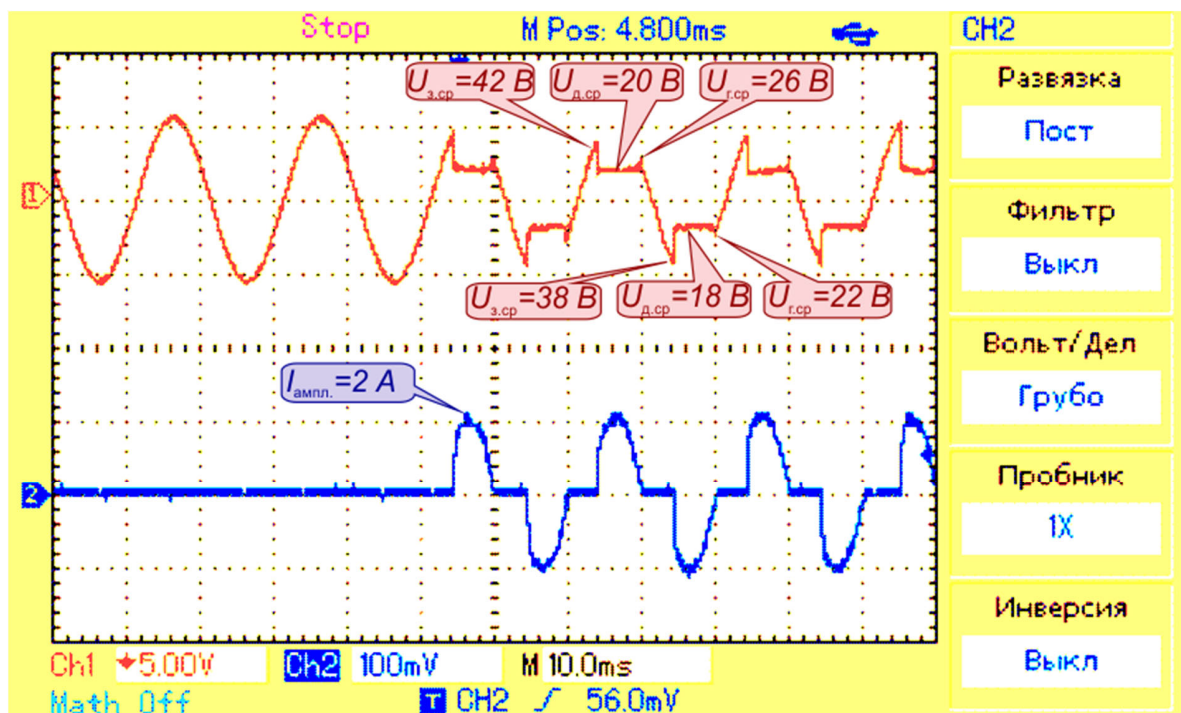


Рисунок 3.14 Осциллограмма тока и напряжения последовательной дуги переменного тока с частотой 50 Гц при резистивной нагрузке (электроды: медь-алюминий)

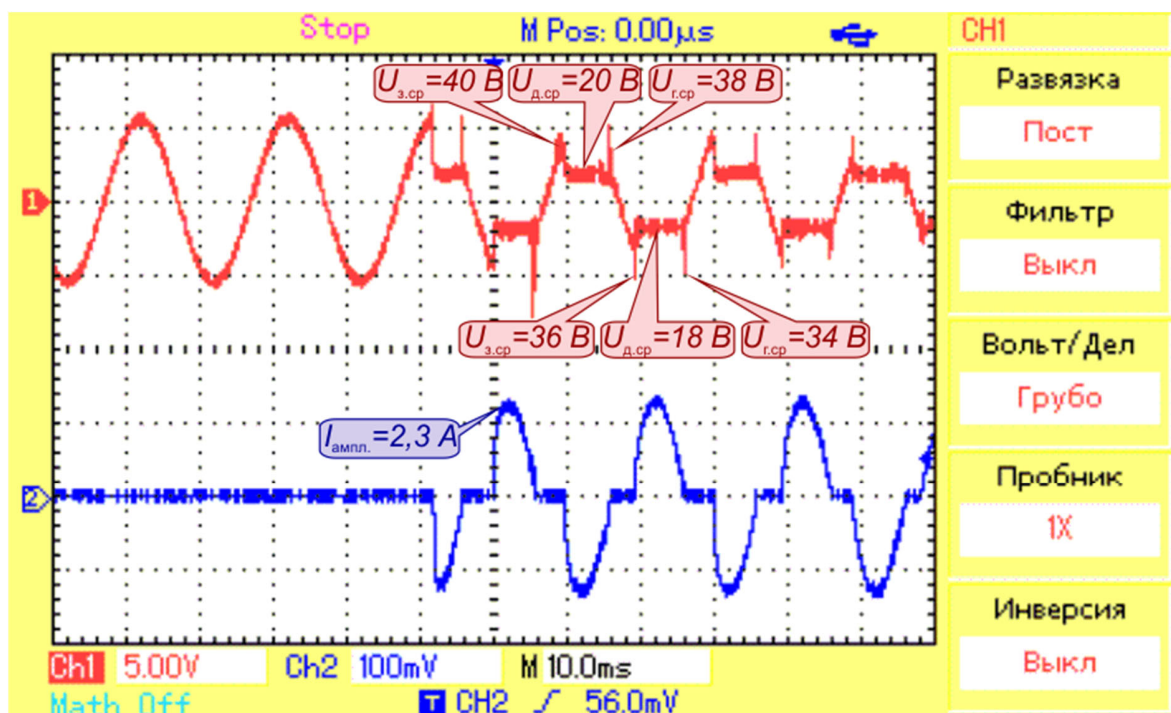


Рисунок 3.15 Осциллограмма тока и напряжения последовательной дуги переменного тока с частотой 50 Гц при индуктивно-резистивной нагрузке (электроды: медь-алюминий)

На осциллограммах видно, что напряжение зажигания дуги уменьшилось с 42 В при резистивной нагрузке до 40 В при индуктивно-резистивной нагрузке, при этом падение напряжения на плазменном столбе не изменилось (так как материалы электродов остались неизменными), увеличилась амплитуда хаотического шума (в несколько раз), увеличилось напряжение гашения дуги с 26 В до 38 В. В целом, характер изменения формы напряжения и тока последовательной дуги при подключении индуктивно-резистивной нагрузки с постоянной времени нормированной по ОСТ 101108-84 [66, стр.20], остается неизменным.

Разница в амплитудах зажигания дуги, гашения дуги и падения напряжения при положительной и отрицательной полуволне объясняется различием в материалах электродов.

3.3.2 Параметры внешней среды

3.3.2.1 Материал и чистота поверхности соприкасающихся электродов

С целью исследования свойств последовательного дугового разряда при контакте электродов из различных материалов был проведен эксперимент по зажиганию последовательной дуги в сети переменного тока с частотой 50 Гц при резистивной нагрузке. В качестве соприкасающихся электродов применялись пары из медных электродов, медного и алюминиевого и медного и стального электродов. Осциллограммы тока и напряжения последовательной дуги между медными электродами представлены на рисунке 3.16.

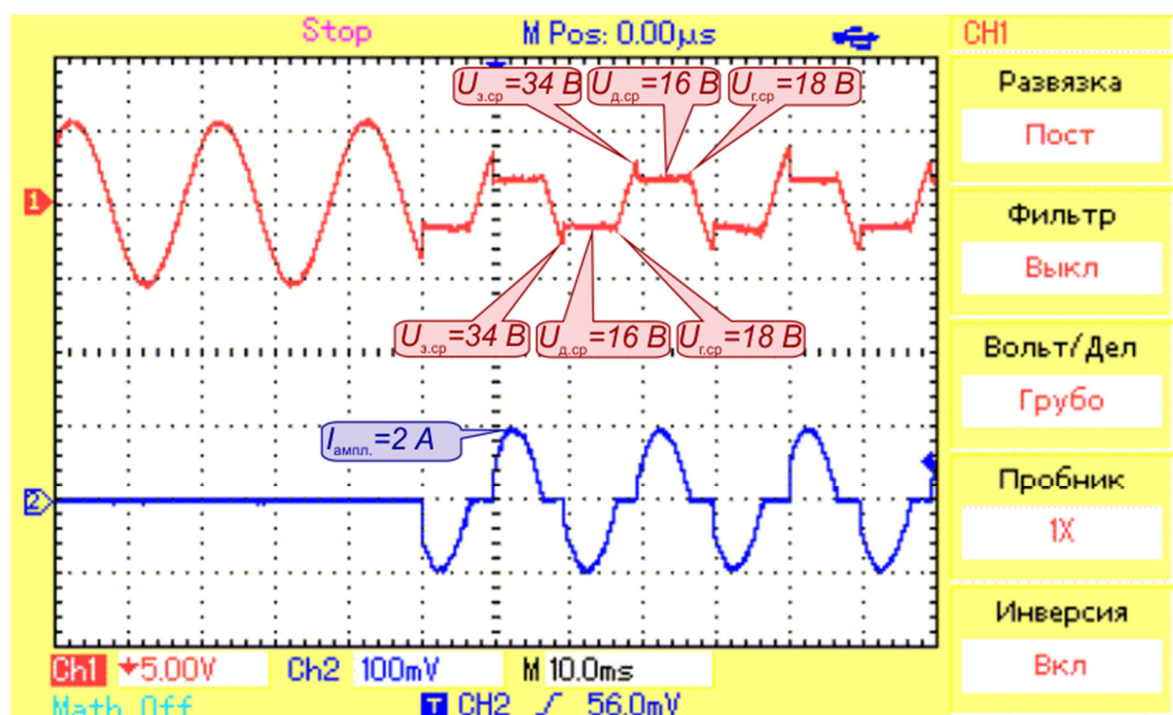


Рисунок 3.16 Осциллограмма тока и напряжения последовательной дуги переменного тока между медными электродами

На осциллограммах видно, что среднее напряжение зажигания дуги составляет порядка 34 В, падение напряжения на плазменном столбе – около 16 В

и остается неизменным в течении всего времени горения столба, среднее напряжение гашения дуги составляет около 18 В. Амплитуда тока в цепи равна 2 А.

В ходе эксперимента было обнаружено, что при очистке поверхности медных электродов от следов нагара дуговой разряд стал хуже зажигаться, при этом плазменный столб горит неустойчиво и только при механических вибрациях межэлектродного пространства (рисунок 3.17). Осциллограммы тока и напряжения последовательной дуги между чистыми медными электродами представлена на рисунке 3.18.

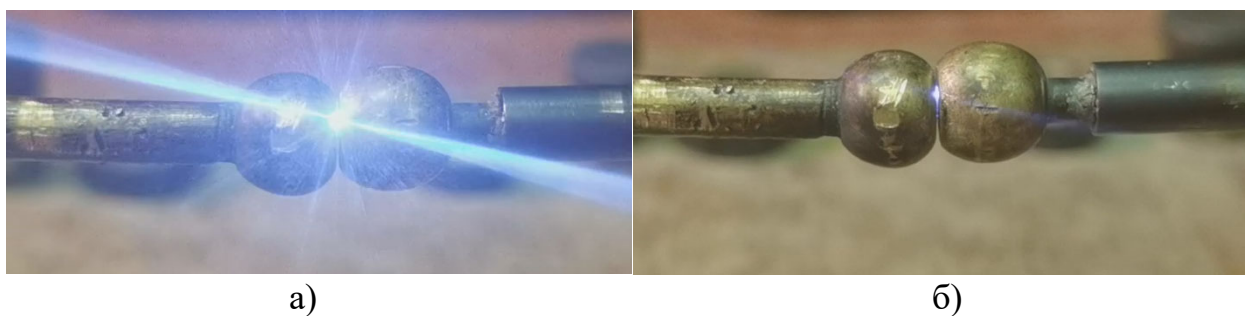


Рисунок 3.17 Фотографии последовательного дугового разряда между медными электродами, покрытыми нагаром (а) и между чистыми медными электродами (б).

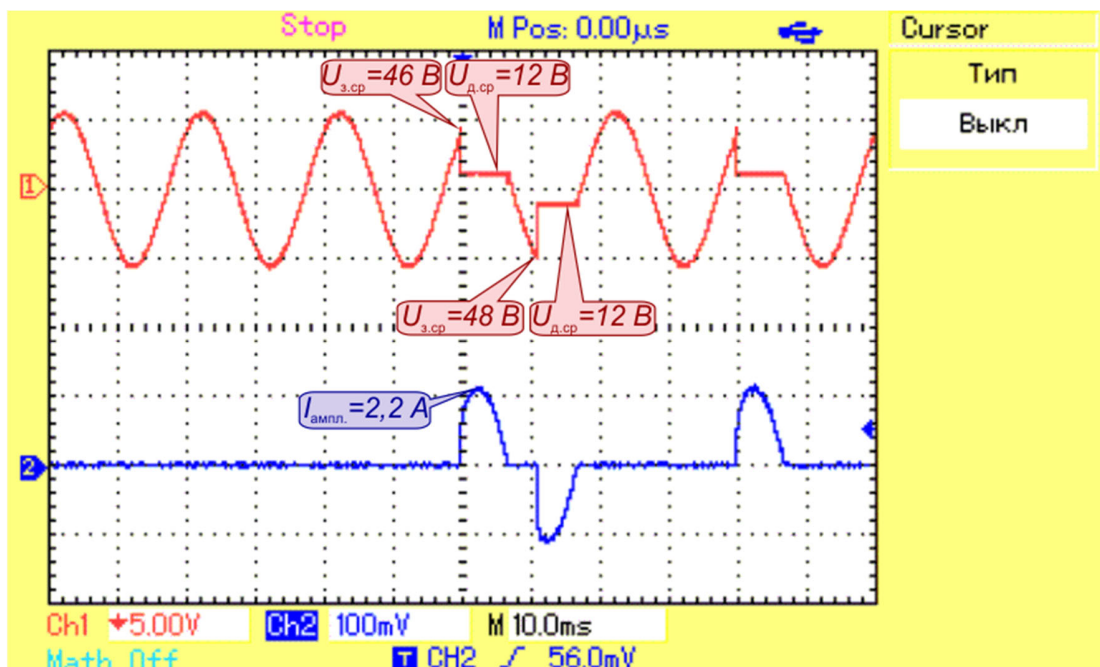


Рисунок 3.18 Осциллограмма тока и напряжения последовательной дуги переменного тока между чистыми медными электродами

На осциллограммах видно, что среднее напряжение зажигания дуги повысилось до 46-48 В, что объясняется отсутствием на поверхности пленки окиси меди, работа выхода электрона в которой меньше, чем у чистой меди (таблица 2). Падение напряжения на плазменном столбе составляет около 10 В и остается неизменным в течении всего времени горения столба. Снижение падения напряжения объясняется высоким удельным сопротивлением оксида меди (таблица 3), образованного на поверхности медных электродов с нагаром, который увеличивает сопротивление межэлектродного участка. Среднее напряжение гашения дуги составляет около 10-12 В, амплитуда тока в цепи равна 2,2 А.

Таблица 3 Электрические свойства некоторых материалов

Материал	Удельное сопротивление
Медь (Cu)	0,0167 Ом·мм ² /м
Оксид меди (CuO)	1,00·10 ³ Ом· мм ² /м
Алюминий (Al)	0,0280 Ом· мм ² /м
Сталь	0,15 Ом· мм ² /м

Осциллограммы тока и напряжения последовательной дуги между медным и алюминиевым электродами представлены на рисунке 3.19.

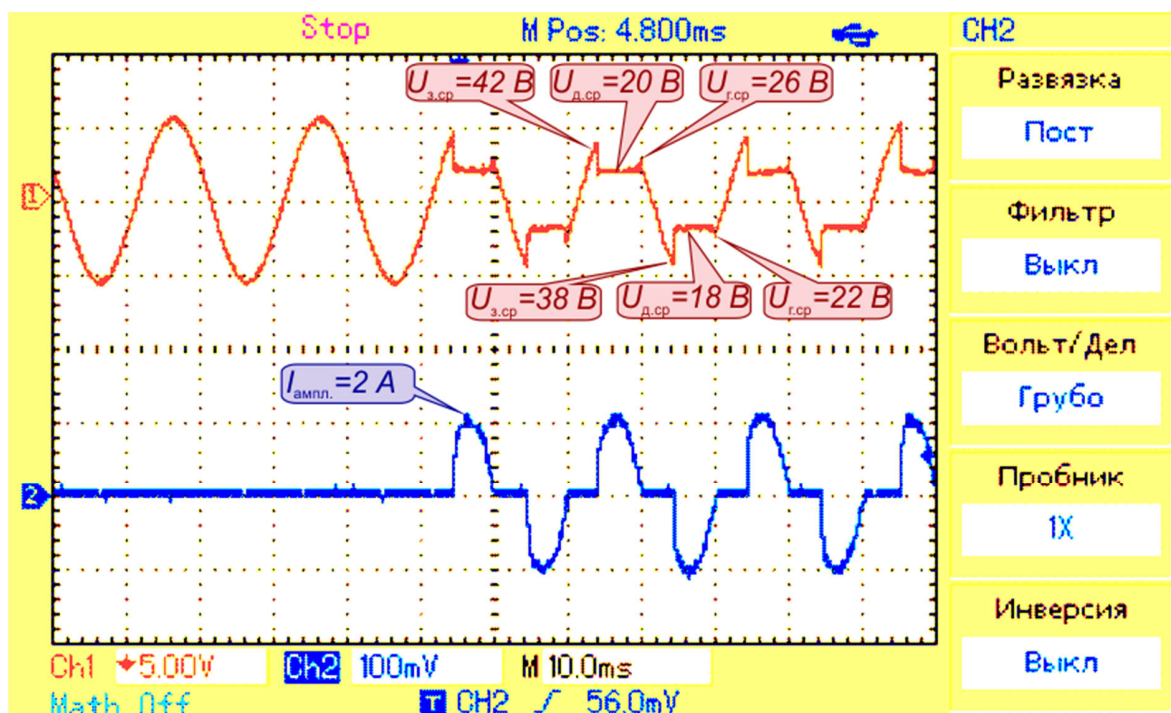


Рисунок 3.19 Осциллограмма тока и напряжения последовательной дуги переменного тока между медным и алюминиевым электродами

На осциллограммах видно, что среднее напряжение зажигания дуги составляет порядка 42 В, падение напряжения на плазменном столбе – около 20 В и остается неизменным в течении всего времени горения столба, среднее напряжение гашения дуги составляет около 26 В. Амплитуда тока в цепи равна 2 А.

Увеличение напряжения зажигания последовательной дуги связано с увеличением работы выхода электрона из алюминия, по сравнению с работой выхода у оксида меди (таблица 2), при этом напряжение зажигания дуги на алюминиевом электроде меньше, чем напряжение зажигания дуги на чистом медном электроде. Увеличение падения напряжения на плазменном столбе связано с увеличением общего сопротивления цепи из-за высокого удельного сопротивления оксида меди (таблица 3). Следует также отметить, что разница в амплитудах зажигания дуги, гашения дуги и падения напряжения при положительной и отрицательной полуволне объясняется различием в материалах электродов.

Осциллограммы тока и напряжения последовательной дуги между медным и стальным электродами представлены на рисунке 3.20.

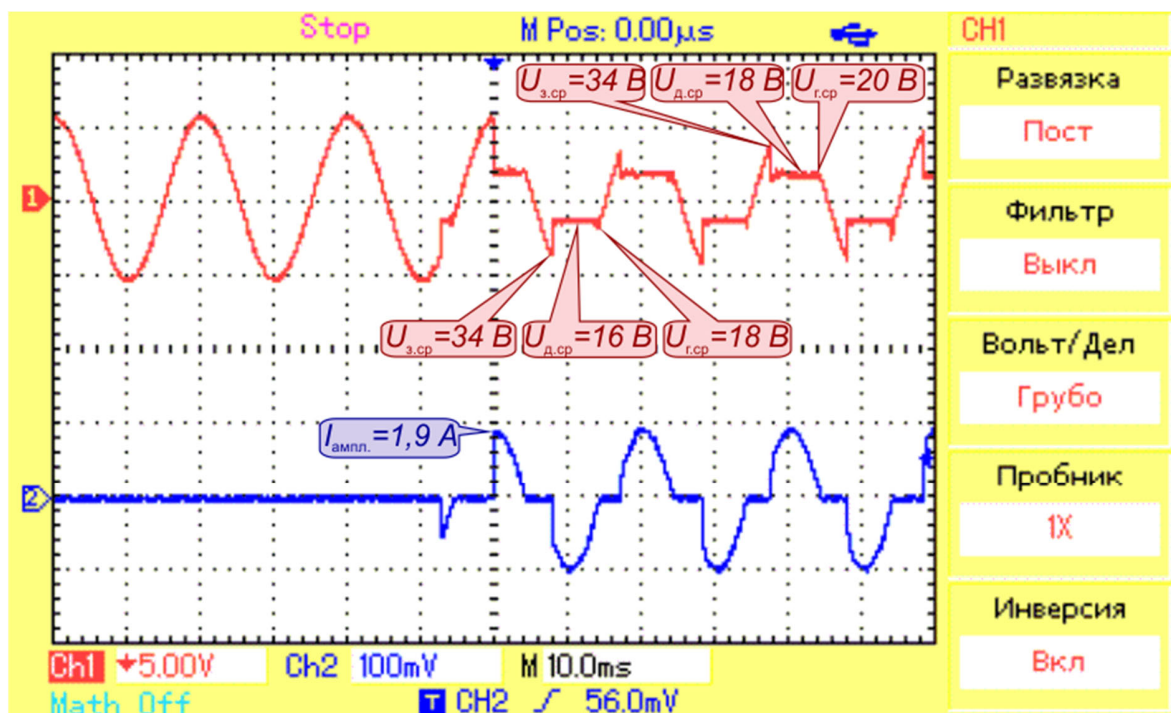


Рисунок 3.20 Осциллограмма тока и напряжения последовательной дуги переменного тока между медным и стальным электродами

На осциллограммах видно, что среднее напряжение зажигания дуги составляет порядка 34 В, падение напряжения на плазменном столбе – около 18 В и остается неизменным в течении всего времени горения столба, среднее напряжение гашения дуги составляет около 20 В. Амплитуда тока в цепи равна 1,92 А.

Уменьшение напряжения зажигания последовательной дуги связана с уменьшением работы выхода электрона из стали, по сравнению с работой выхода у оксида меди (таблица 2). Незначительное увеличение падения напряжения на плазменном столбе связано с увеличением общего сопротивления цепи из-за высокого удельного сопротивления стали (таблица 3).

Равенство падений напряжений пары медь-сталь с парой медь-медь (с нагаром) объясняется, во-первых, меньшим током нагрузки у пары медь-сталь, то

есть при схожих токах падение напряжение на дуге между медным и стальным электродами было бы еще больше, а, во-вторых, малой толщиной оксидной пленки на медных электродах. Следует также отметить, что разница в амплитудах зажигания дуги, гашения дуги и падения напряжения при положительной и отрицательной полуволне объясняется различием в материалах электродов.

С целью более удобного восприятия результаты проведенных экспериментов сведены в таблицу 4.

Таблица 4 Свойства последовательной дуги в зависимости от материалов соприкасающихся электродов

Материал электродов Параметры	Медь – Медь (с нагаром) (Cu–CuO)	Медь – Медь (чистые) (Cu–Cu)	Медь – Алюминий (Cu–Al)	Медь – Сталь (Cu–Fe)
Сложность зажигания	низкая	высокая	низкая	средняя
Горение дуги	устойчивое непрерывное	неустойчивое прерывистое	устойчивое непрерывное	устойчивое прерывистое
Искрообразование	нет	нет	да	да
Наличие хаотического шума	да	да	да	нет

3.3.2.2 Механическая вибрация

С целью исследования воздействия механических вибраций дугового промежутка на свойство последовательной дуги стенд по зажиганию был помещен на вибрационный стол, частота вибраций которого балы задана в диапазоне от 0 до 2000 Гц. Результаты проведенных исследований представлены на рисунках 3.21 и 3.22. Зажигание последовательной дуги проводилось в сети переменного тока с частотой 50 Гц при резистивной нагрузке и контакте медного и алюминиевого электродов.

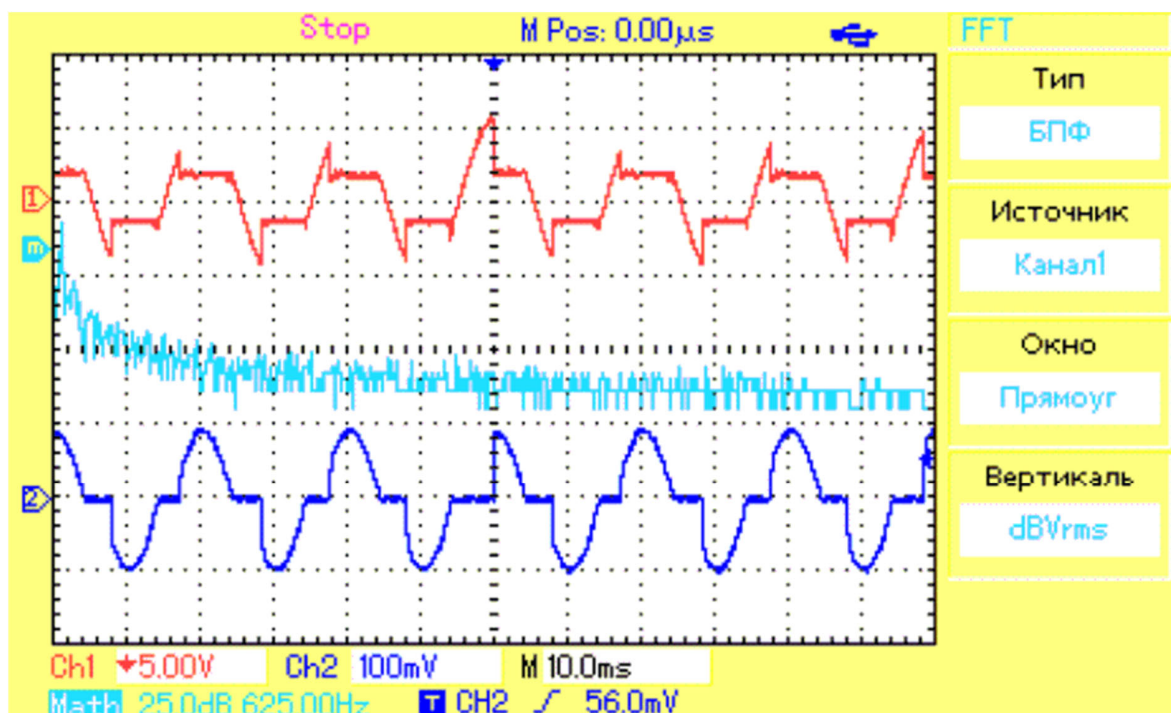


Рисунок 3.21 Осциллограмма тока и напряжения последовательной дуги переменного тока без механической вибрации контактов

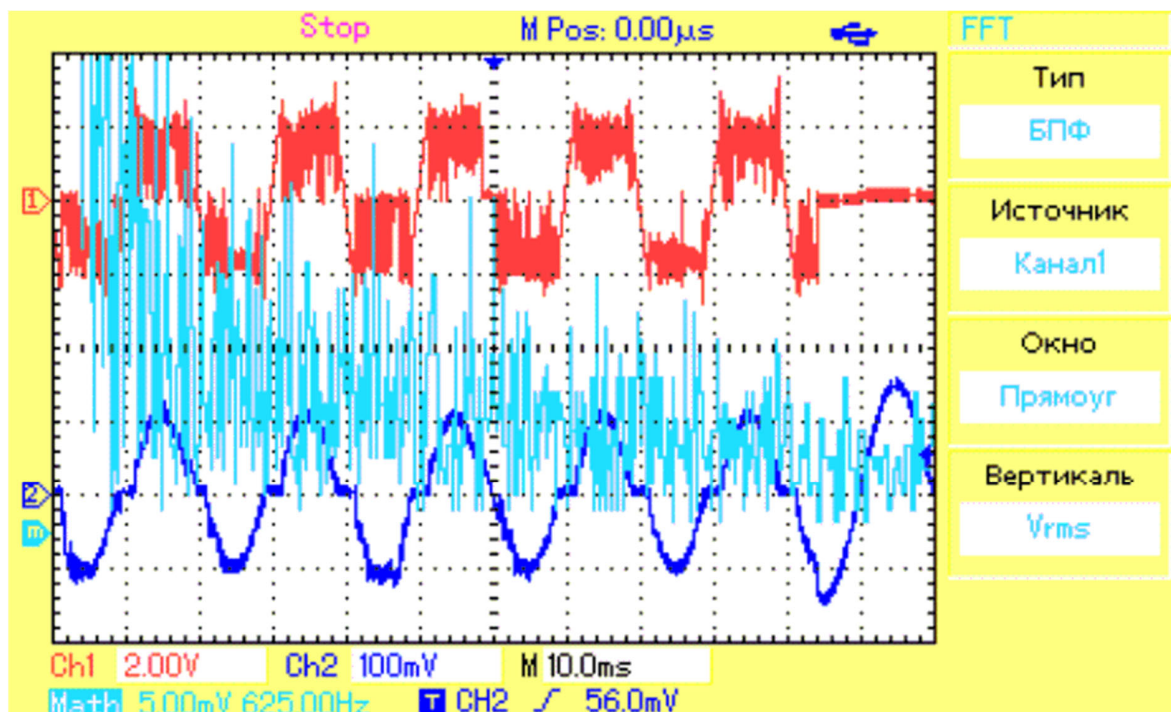


Рисунок 3.22 Осциллограмма тока и напряжения последовательной дуги переменного тока с механической вибрацией контактов

На осциллограммах напряжения последовательной дуги при механической вибрации можно в некоторых периодах выделить напряжение зажигания и гашения дуги, амплитуда хаотического шума достигает значительных величин, которые по величине сопоставимы с амплитудой зажигания дуги. Аналогичный хаотический шум, но меньший по амплитуде наблюдается на осциллограмме тока.

На рисунках 3.21 и 3.22 голубым графиком показан спектральный состав тока нагрузки. При отсутствии вибрации видно наличие несущей частоты тока, а также ряд частот хаотического шума с небольшими весовыми коэффициентами. При наличии механических вибраций наблюдается значительное увеличение как весовых коэффициентов, так и частот широкополосного хаотического шума. Таким образом, наличие механических вибраций дугового промежутка, которые являются неотъемлемой частью внешних воздействующих факторов для авиационного оборудования, позволяет однозначно определить, что хаотический шум является неотъемлемой частью последовательной дуги, возникающей на борту летательного аппарата.

3.4 Энергетическое соотношение фаз горения

При возникновении последовательного дугового разряда опасность вызывает не только плазменная фаза горения дуги, которая сопровождается устойчивыми высокими температурами плазменного столба, искрообразованием и выбросами расплавленного металла, представляющие опасность воспламенения окружающих материалов, но и резистивная фаза горения, которая опасна продолжительным сильным нагревом контактного промежутка до высоких температур. При попадании посторонних предметов на разогретые электроды наблюдается локальное образование дыма, иногда заканчивающееся возгоранием.

Интересным аспектом исследования свойств дугового разряда является определение соотношения выделяемой энергии в окружающее пространство при

резистивной и плазменной фазе горения дуги, учитывая тот факт, что данные фазы могут хаотически сменять друг друга (рисунок 3.8).

Известно исследование [100, стр. 103], в котором проводилось относительное сравнение выделяемой мощности при резистивной и плазменной фазе горения дуги для различных контактов и электрических нагрузок. Параметром, который позволял выделить резистивную фазу горения дуги на фоне плазменной, было выбрано напряжение на межэлектродном пространстве. Опытным путем было установлено, что порог в 8 В позволяет точно разделить фазы горения дуги. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 5. В качестве примера на рисунке 3.23 и 3.24 показаны мощность, выделяемая при резистивной и плазменной фазе горения дуги, а также их процентное соотношение при продолжительном горении дуги.

Таблица 5 Мощность и процентное соотношение выделяемой энергии при
плазменной фазе горения дуги

Ток нагрузки (А)	Суммарная мощность, (Вт)	Мощность при плазменной фазе, (Вт)	Доля плазменной фазы, %	Описание / Комментарий
3	6.7	1.7	25	Резистивная нагрузка 44,20 Ом, клеммная колодка промышленная
10	41.3	9.89	24	Резистивная нагрузка 12,78 Ом, клеммная колодка авиационная
15	43.4	10.4	24	Резистивная нагрузка 8,45 Ом, клеммная колодка авиационная
3	5.3	1.8	34	Нагрузка: стробоскоп, клеммная колодка авиационная
7	11.6	1.1	9	Светодиодное (LED) освещение постоянного тока 28 В, клеммная колодка авиационная
3	1.43	0.21	15	Ламповое освещение постоянного тока 28 В, клеммная колодка авиационная
3	7.5	2.0	27	Бортовые аэронавигационные огни
3	6.0	1.7	28	
~5	13.7	4.8	35	Нагрузка типа нагреватель
~5	8.7	3.4	39	Вентиляторная нагрузка
~5	15.0	4.9	33	
~1	3.4	3.2	94	Нагрузка на клапан поперечной подачи 28 В постоянного тока
~1	2.6	2.2	85	
~ 40 А	9.7	7.4	76	Мотор регулировки кресла пилота

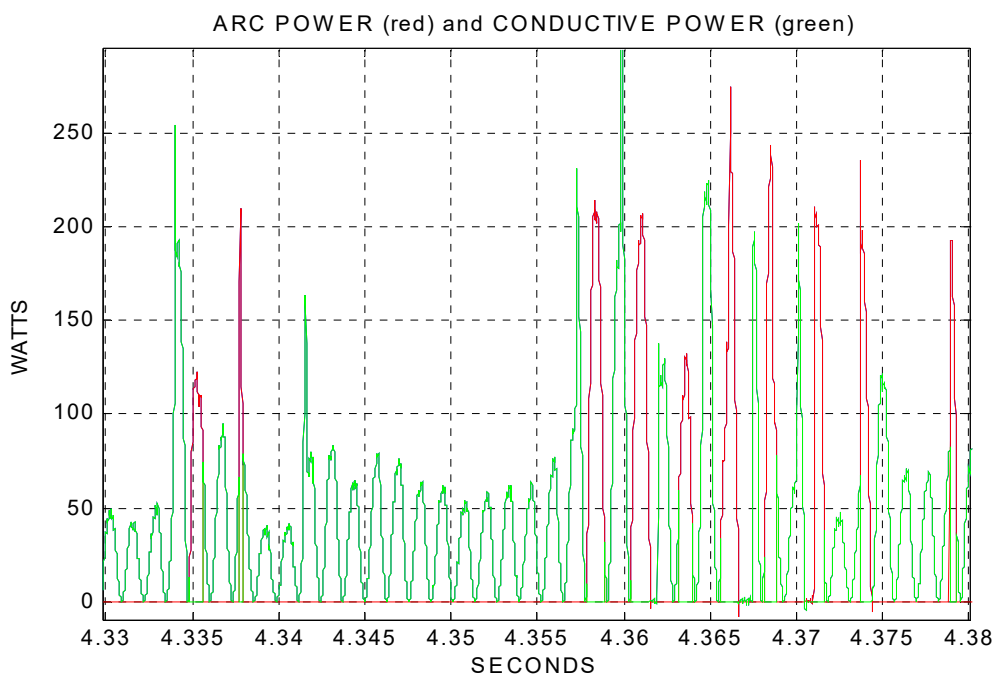


Рисунок 3.23 Мощность, выделяемая при плазменной и резистивной фазе горения дуги

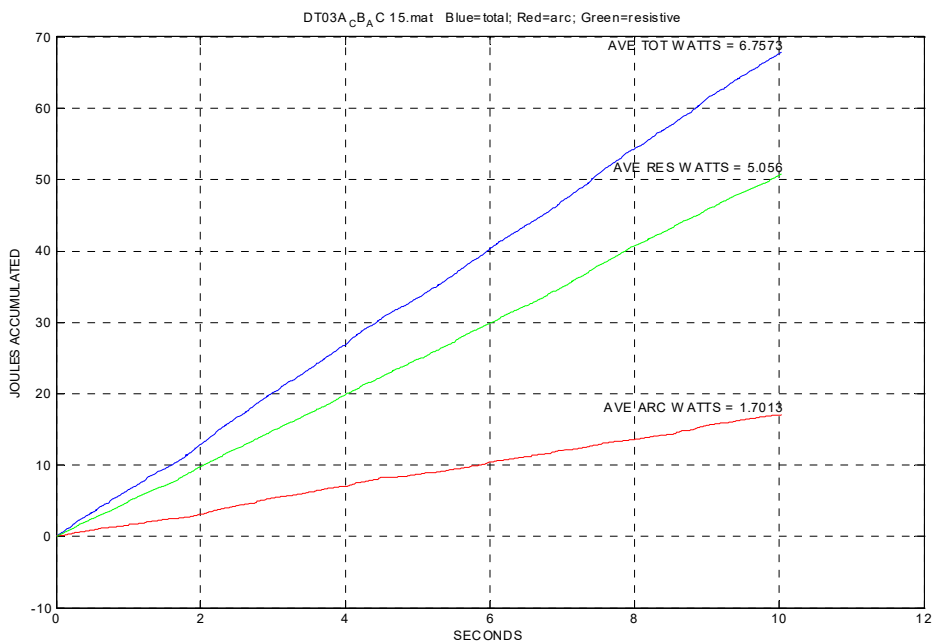


Рисунок 3.24 Соотношение мощностей, выделяемых при плазменной и резистивной фазе горения дуги при вибрации клеммной колодки

По результатам опубликованных исследований следует отметить, что процент выделяемой мощности при плазменной фазе горения дуги сильно зависит от типа нагрузки. В подавляющем количестве случаев наибольшая мощность выделяется при резистивной фазе горения дуги, поскольку она имеет большую продолжительность горения, несмотря на медленное и постепенное выделение энергии в виде прогрева провода, изоляции и межэлектродного промежутка.

Плазменная фаза горения дуги происходит со значительным выделением энергии в окружающую среду путем излучения, конвекции, ударной ионизации и теплопроводности. Однако, за счет скоротечности её процессов средняя (интегрированная по времени) выделяемая мощность меньше, чем у резистивной.

3.5 О способах идентификации последовательной дуги переменного тока

Электрические дуговые разряды являются хорошо изученным явлением, по которому написано большое количество исследований, направленных как на изучение его характерных свойств, так и на создание способов обнаружения. Существуют две группы методов обнаружения дуги, к первой группе относится обнаружение дуги по характерным ее признакам, а именно: наличие широкополосного «розового» шума, рекурсивность процессов протекания тока, хаотичность изменения параметров шума, наличие «фликкер-эффекта», наличие искажений в форме кривой тока, характерная форма напряжения. 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 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 с использованием цифровой вычислительной техники. Для реализации этих методов необходимо знание электрических моделей цепей питания нагрузок, отсутствие которых 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. К недостаткам относятся: отсутствие универсальности к нагрузкам, необходимость индивидуальных настроек (программирования средств защиты), необходимость учёта возможных изменений параметров нагрузок. Кроме того, использование цифровой вычислительной техники в составе транзисторного автомата защиты и коммутации авиационных электросетей приводит к недопустимому росту массы и объёма последнего, так как работа электронного устройства на борту летательного аппарата, подразумевает собой воздействие большого количества помех (от кабелей питания, фидеров связи или от внешних источников помех), что потребует значительных работ по экранированию цифровой вычислительной техники.

Таким образом, для реализации методов обнаружения дуги был выбран способ индикации, относящиеся к первой группе методов обнаружения. Проанализируем возможные варианты их применения.

1. Понятие «шум дуги» относится к хаотическим процессам внутри плазменного столба и может оказаться неприменимым к току в резистивной фазе. Описанные выше эксперименты обнаруживают временные интервалы, не содержащие плазменных процессов (рисунок 3.4, 3.5, 3.8).

Для ответа на возникающий вопрос о наличии шума в резистивной фазе сравним спектры токов в межэлектродных промежутках, образованных медными электродами в цепи с резистивной нагрузкой. На рисунке 3.23 приведён непрерывный спектр плазменного столба в воздушном промежутке между медными электродами. На рис 3.24 – спектр тока через неплотно сомкнутые электроды в той же схеме, свидетельствующий о практически полном отсутствии плазменного шума, что исключает, либо существенно затрудняет индикацию дуги в устойчивой резистивной фазе.

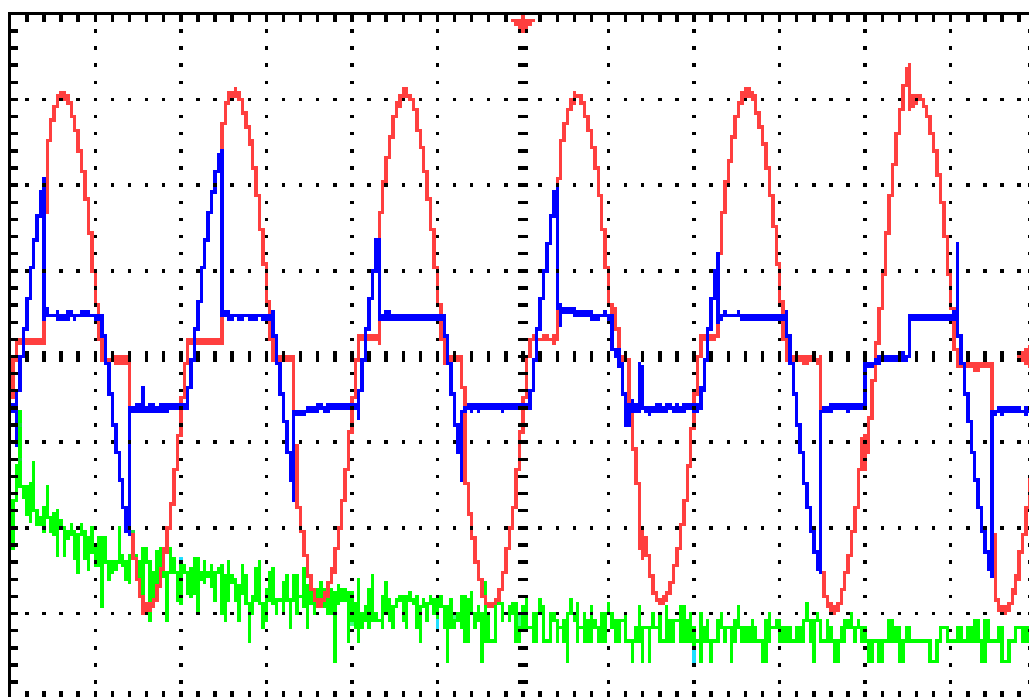


Рисунок 3.25 Осциллограммы тока, напряжения на медных электродах, а также спектр тока при плазменной фазе горения дуги.

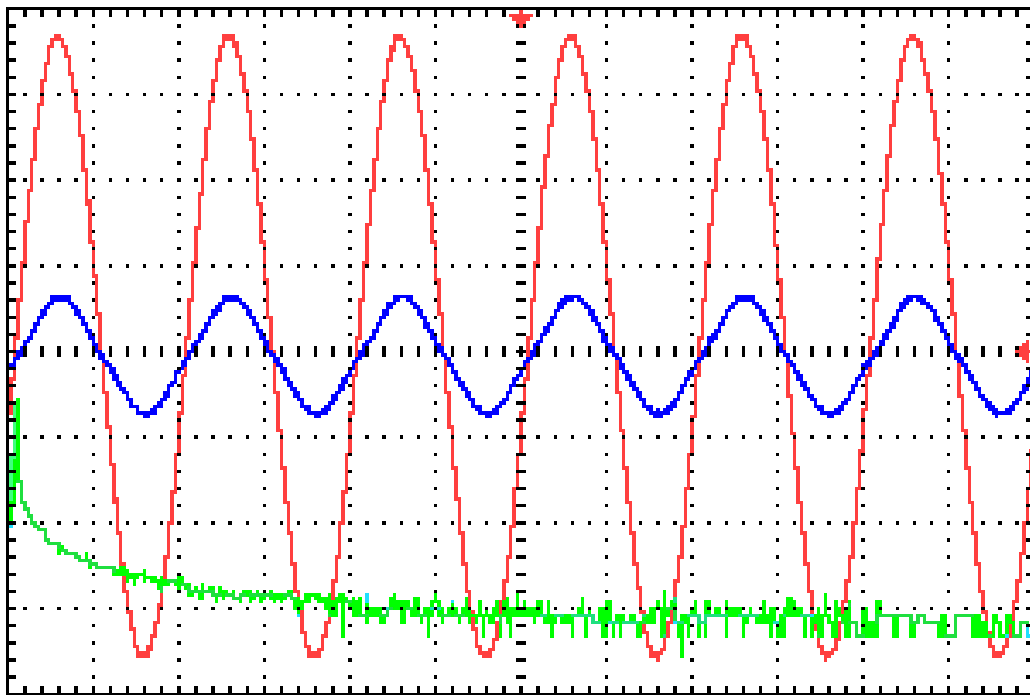


Рисунок 3.26 Осциллограммы тока, напряжения на медных электродах, а также спектр тока при резистивной фазе горения дуги.

2. Удачным решением проблемы индикации дуги было бы выявление некоторого качественного её признака, свободного от количественных характеристик. Таким признаком является, например, форма осциллограммы напряжения на дуге в плазменной фазе, содержащая характерные горизонтальные участки, которые можно обнаружить специализированным электронным устройством «распознавания образа». Однако, напряжение на дуге, появляющееся в произвольном месте системы распределения, не будет иметь общей точки с выводами коммутационно-защитной аппаратуры, поэтому данный метод обнаружения не может быть использован.

3. Плазменные участки в токе можно обнаружить, решив электронными средствами систему уравнений, описывающих аварийный разряд, т.е. имея полную модель процесса с обоими его фазами, что представляется отдельной задачей.

4. Обязательным условием построения средств обнаружения аварийных дуговых разрядов в авиационных электросетях является присутствие внешних

вибраций, исключая статические состояния резистивной фазы и возбуждающих хаотические колебания неплотных электрических контактных соединений.

5. Хаотические колебания электрических соединений. могут быть обнаружены электронными индикаторами хаоса.

3.6 Вывод

1. Рассмотрены основные физические процессы, протекающие в дуговом разряде. Установлено, что в условиях авиационных электросетей аварийный дуговой разряд может возникнуть только из-за механизма термоэлектронной эмиссии.

2. Определено, что горение последовательного аварийного дугового разряда может происходить по двум фазам: резистивной и плазменной, – которые могут сменять друг друга случайным образом.

3. Обнаружено, что осциллограммы тока и напряжения резистивной фазы горения дуги похожи на осциллограммы тока и напряжения участка цепи с высоким сопротивлением, горение резистивной фазы сопровождается интенсивным разогреванием электродов, увеличением падения напряжения на участке цепи, отсутствием плазменного дугового столба, искрообразования и широкополосного хаотического шума.

4. Определено, что при плазменной фазе горения дуги происходит значительный разогрев электродов, между которыми возникает плазменный столб с высокой температурой и ярким свечением, появляется спонтанное искрообразование, в осциллограммах тока и напряжения присутствует широкополосный хаотический шум.

5. Установлена зависимость процесса протекания плазменной фазы горения дуги и осциллограмм тока и напряжения от типа материала электродов, чистоты поверхности, напряжения и частоты электросети. Обнаружено, что устойчивое

горение последовательной дуги возможно только между алюминиевым и медным электродами, а горение дуги между медными, а также между медным и стальным электродами носит неустойчивый и кратковременный характер, при этом подтверждено отсутствие хаотического шума при плазменной фазе горения дуги между медным и стальным электродом. Определено, что частота авиационной электросети не вносит значительных изменений в форму тока и напряжения последовательной дуги по сравнению с дугой в сети с промышленной частотой.

6. Экспериментальным путем обнаружено, что наличие внешних механических вибраций, обусловленных вибрациями конструкции летательного аппарата, возбуждает широкополосный шум с хаотическим изменением его параметров независимо от материала электродов.

7. Показано, что энергетическое соотношение резистивной и плазменной фазы горения дуги зависит от типа нагрузки, но для подавляющего большинства авиационных нагрузок являются сопоставимыми величинами, поскольку резистивная фаза имеет длительное горение с медленным прогреванием токопроводящего промежутка, а плазменная фаза горения является скоротечным процессом с высоким уровнем выделяемой энергии.

8. Перечислены факторы внешней среды, облегчающие зажигание и горение последовательного дугового разряда переменного тока.

9. Представлено описание особенностей поведения тока и напряжения последовательного дугового разряда в авиационных электросетях переменного тока, а именно:

- наличие нулевых участков в осциллограмме тока («плечи» тока), иллюстрирующие периодическое исчезновение плазменного столба дуги на время его деионизации,
- наличие практически горизонтальных участков в осциллограмме напряжения, отражающие действие тепловой обратной связи в столбе дуги и малую тепловую инерционность процессов,

- наличие пиков напряжения зажигания и гашения дуги,
- заметная разница в напряжениях зажигания и гашения дуги, связанные с гистерезисом её вольт - амперной характеристики;
- изменение значений напряжения зажигания и гашения дуги в процессе её горения;
- наличие хаотического шума широкого спектра, характерного только для плазменной фазы горения дуги.

10. Установлено, что обязательным условием построения средств обнаружения аварийных дуговых разрядов в авиационных электросетях является присутствие внешних вибраций, исключая статические состояния резистивной фазы и возбуждающих хаотические колебания неплотных электрических контактных соединений, благодаря чему сформулированы способы идентификации последовательного дугового разряда переменного тока по наличию хаотических изменений параметров сети.

Глава 4 Проектирование блоков распознавания и регистрации дугового разряда в авиационных сетях переменного тока

Согласно проведенным экспериментам по изучению свойств последовательного дугового разряда в авиационных сетях переменного тока, возникновение дугового разряда или наличие в цепях условий для его появления (незатянутые болтовые соединения) сопровождается образованием в синусоидальном токе широкополосного шума, отличительной особенностью которого является хаотическое изменение его амплитуды, частоты и фазы. Таким образом, применение в составе автомата защиты цепи с функцией гашения дуги блоков распознавания и регистрации хаотического сигнала позволяет отключить защищаемую сеть при наличии условий для зажигания дуги.

Реализация блоков распознавания и регистрации хаоса (следовательно, и дугового разряда) требует разработки основных методов распознавания и проведения длительной отладки с целью минимизации количества ложных срабатываний. На начальном этапе проектирования блоков распознавания и регистрации дуги создание специализированного стенда по зажиганию дугового разряда в строго определенный момент времени со 100% вероятностью нецелесообразно. Таким образом, синтезирование методов распознавания хаоса, их отладка и проработка основных схемотехнических решений по их реализации требует создание математической модели дугового разряда, которая будет имитировать ключевые особенности возникновения и горения дуги, особенно наличие широкополосного шума с хаотичным изменением его амплитуды, частоты и фазы.

4.1 Моделирование последовательного дугового разряда

4.1.1 Структурные схемы и схемотехнические решения по реализации генераторов широкополосного хаотического шума

Существует большое количество различных схемотехнических решений по реализации генераторов хаоса. Рассмотрим некоторые из них и выделим основные достоинства и недостатки. Первый тип генератора хаоса построен на основе нескольких D-триггеров, соединенных последовательно (рисунок 4.1). Выходной сигнал с каждого триггера влияет на работу всех последующих, при этом если просуммировать все выходные сигналы и отфильтровать полученный результат с помощью конденсатора, то на выходе формируется широкополосный хаотический сигнал (рисунок 4.2).

Среди достоинств данной схемы следует отметить её простоту и использование в подавляющем количестве простых логических элементов. К недостаткам данной схемы можно отнести отсутствие возможности регулировать спектр выходного сигнала, существенные затраты вычислительных ресурсов при компьютерном моделировании её работы.

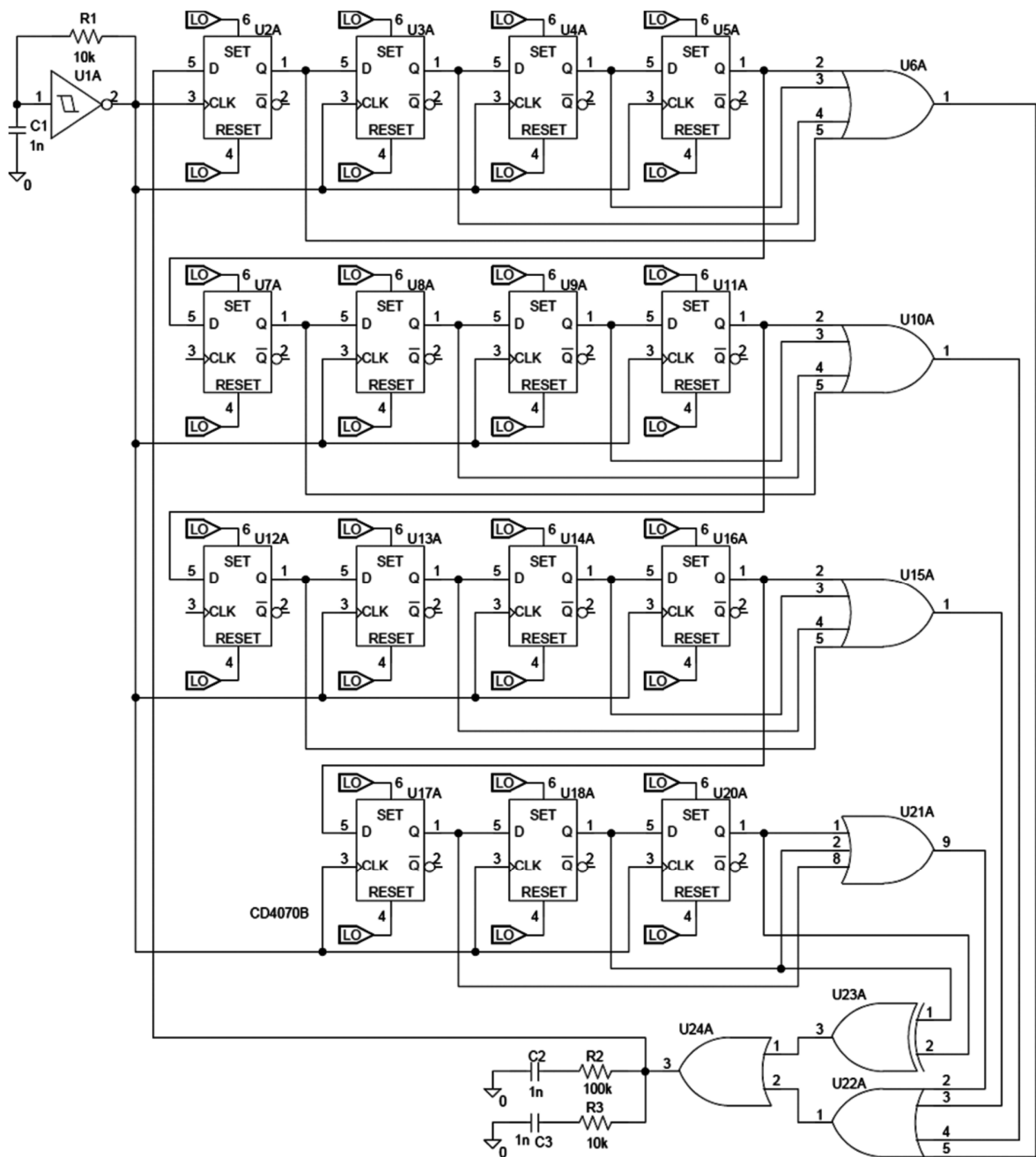


Рисунок 4.1 Модель цифрового генератора хаоса на основе D-триггера

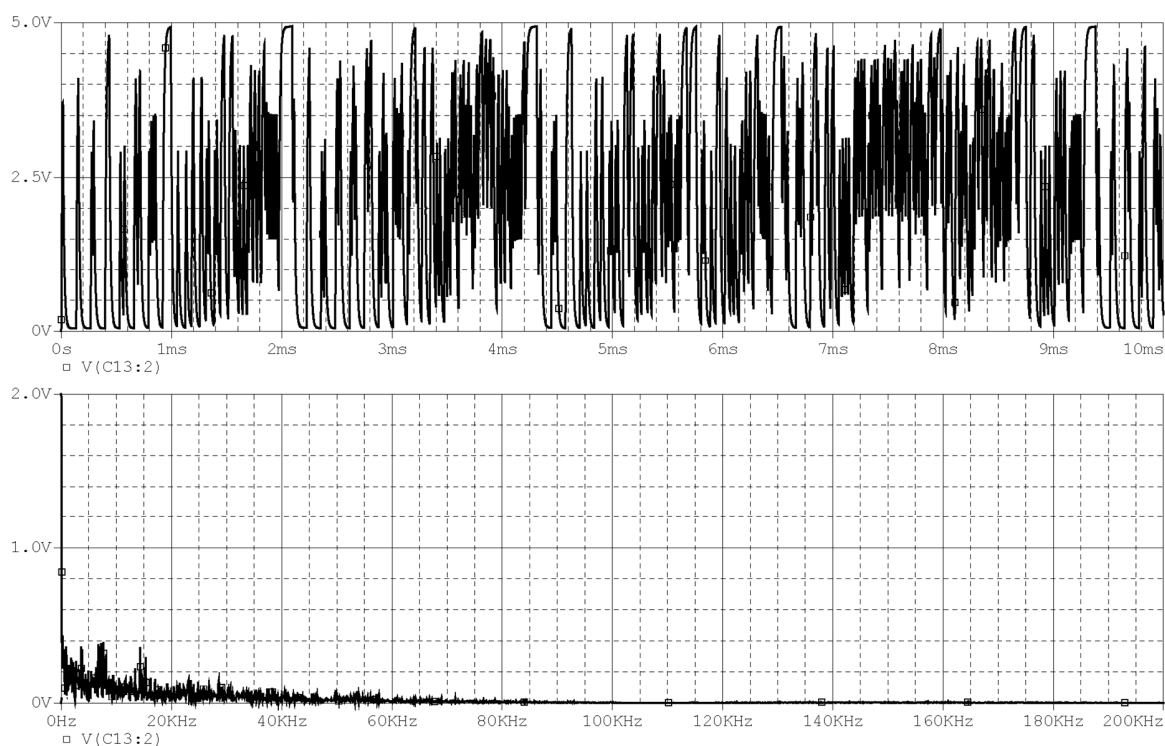


Рисунок 4.2 Выходной сигнал генератора хаоса на D-триггерах (вверху) и его спектр (внизу)

Следующий тип генератора хаоса построен с использованием двух мультивибраторов, между которыми выполнена перекрестная связь. Математическая модель генератора представлена на рисунке 4.3. Мультивибраторы построены на основе компаратора, каждый из которых настроен на определенную частоту. Благодаря введению перекрестной связи между ними, мультивибраторы начинают оказывать влияние на рабочую частоту друг друга. Таким образом, на выходе схемы (например, на конденсаторе C110) будет генерироваться пилообразный сигнал, у которого хаотически будут меняться амплитуда, частота и фаза (рисунок 4.4). К достоинствам схемы можно отнести: значительное сокращение количества элементов, по сравнению с первой схемой, простота реализации, широкий спектр шума. Среди недостатков следует отметить: повышенные затраты вычислительных ресурсов для моделирования работы схемы, узкий диапазон регулирования спектра выходного сигнала.

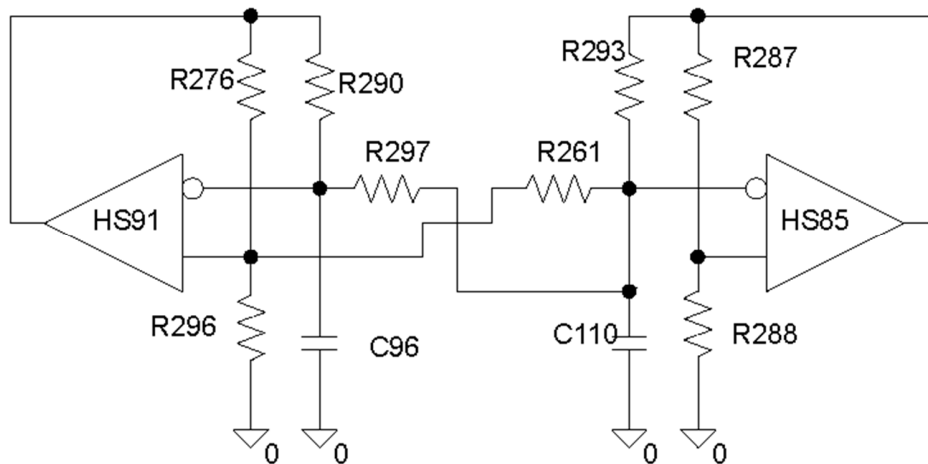


Рисунок 4.3 Модель генератора хаоса на основе двух мультивибраторов с перекрестной связью

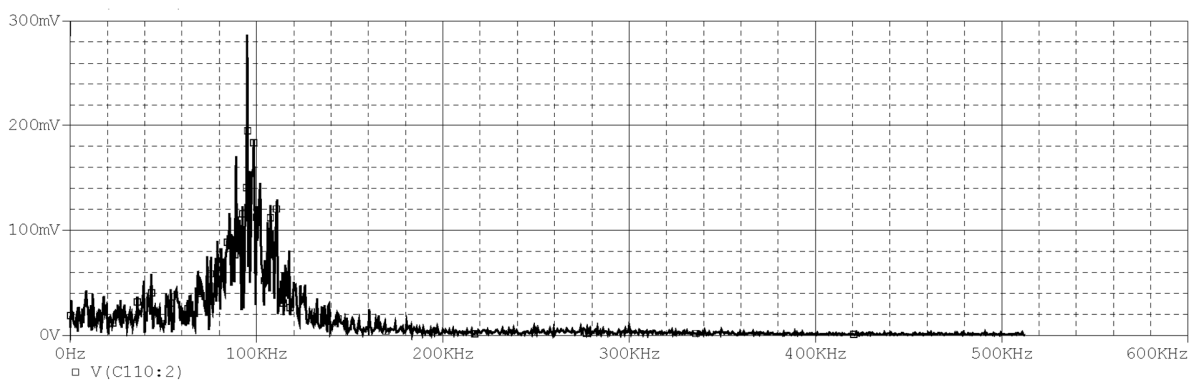
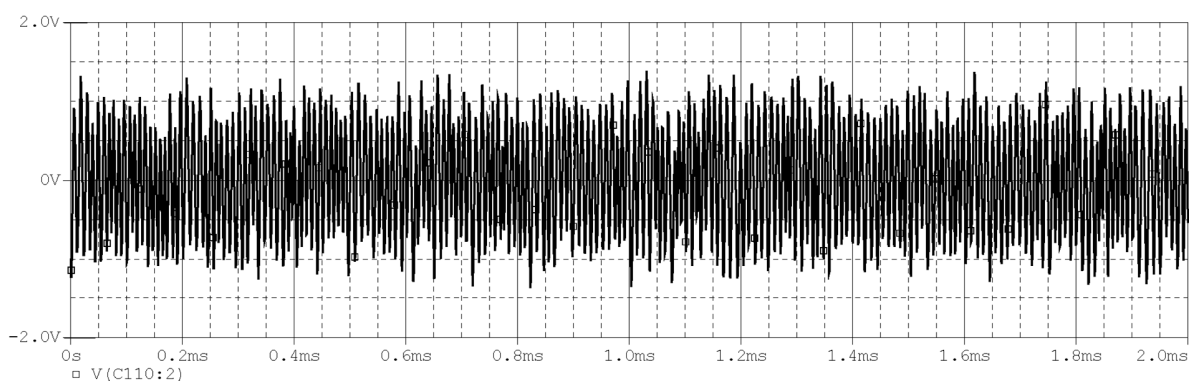


Рисунок 4.4 Выходной сигнал генератора хаоса на двух мультивибраторах (вверху) и его спектр (внизу)

Третий тип генератора хаоса построен с применением генераторов, управляемых напряжением (ГУН), которые построены по классической схеме на основе двух операционных усилителей, соединенных последовательно. Каждый генератор имеет свою настраиваемую постоянную времени. Если в схеме генератора хаоса взять несколько ГУНов, каждый из которых настроен на свою частоту, и замкнуть их определенным образом (для двух ГУНов – замкнуть перекрестной связью (рисунок 4.5), для трех и более ГУНов – в кольцо (рисунок 4.6)), то на выходе можно получить сигнал с хаотическим изменением амплитуды, частоты и фазы (рисунок 4.7). Генератор хаоса, построенный на трех и более ГУНах, является более универсальным, чем генератор хаоса на двух ГУНах, поскольку позволяет регулировать частоту и спектр выходного сигнала в более широком диапазоне.

Генератор хаоса на ГУНах позволяет на выходе получить широкополосный шум в широком спектре, с несколькими основными несущими частотами. Однако математическая модель данного генератора требует значительных вычислительных ресурсов для моделирования работы.

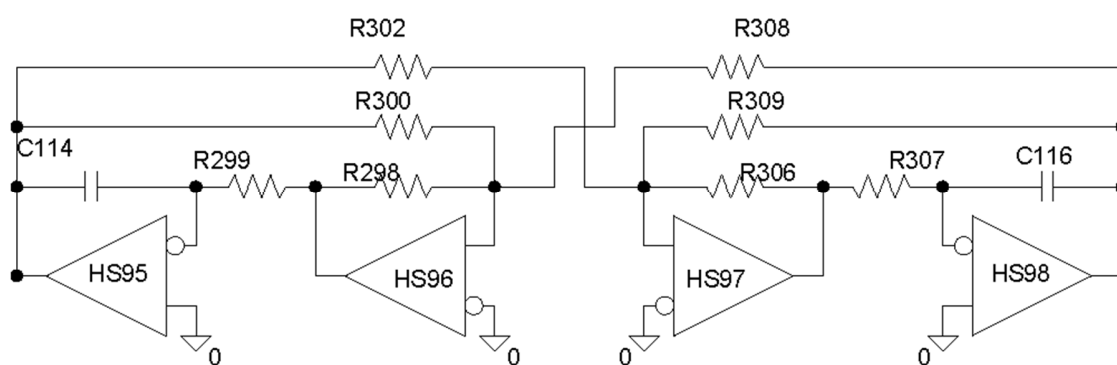


Рисунок 4.5 Модель генератора хаоса на основе двух ГУНов с перекрестной связью

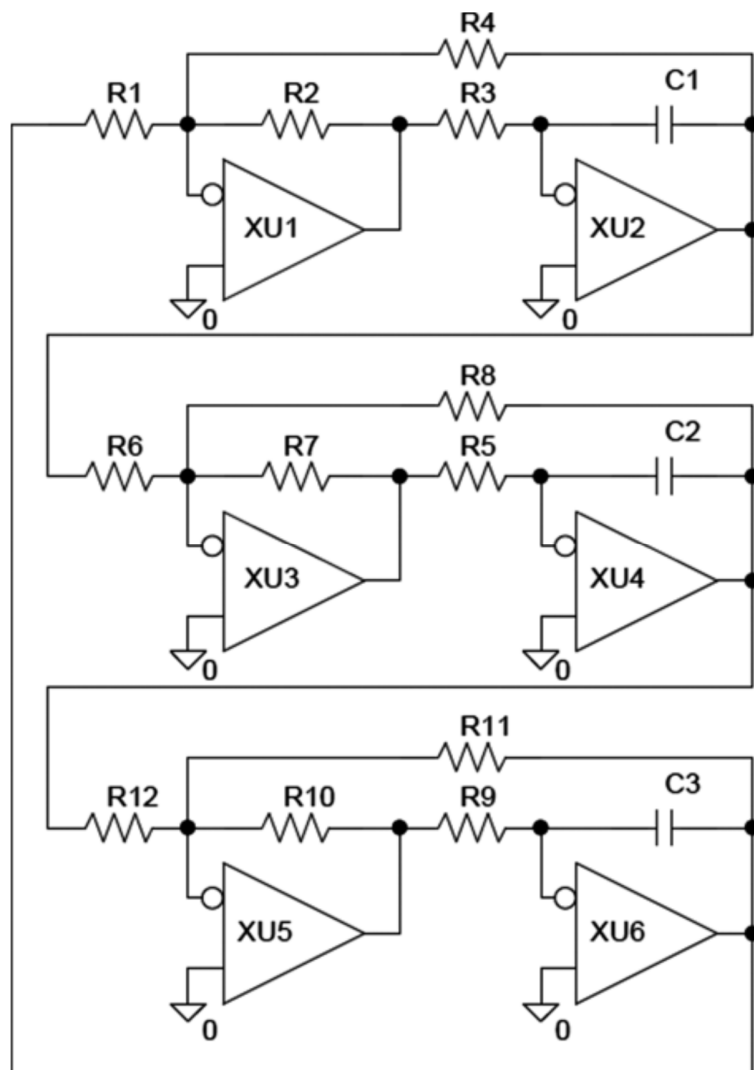


Рисунок 4.6 Модель генератора хаоса на основе трех ГУНов с перекрестной связью (более универсальный генератор хаоса)

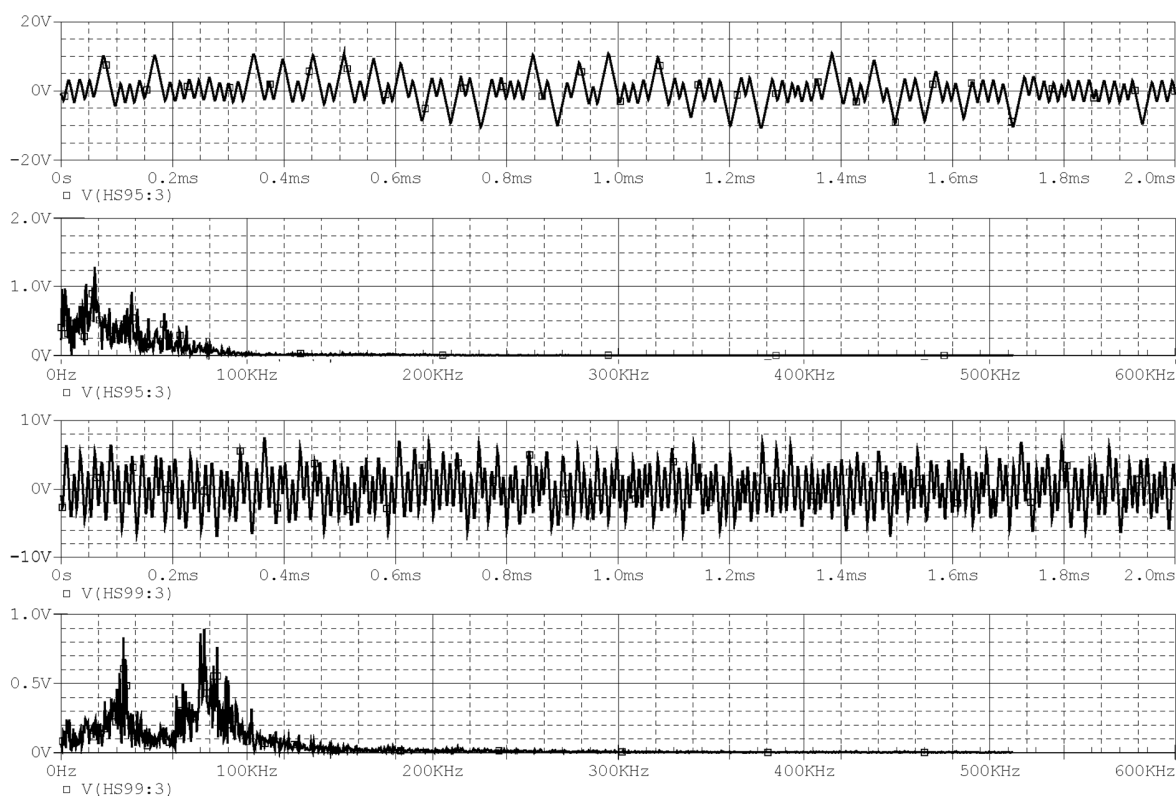


Рисунок 4.7 Выходной сигнал и спектр сигнала генератора хаоса на 2 ГУНах (график 1, 2), и трех ГУНах (график 3, 4)

Четвертый тип генератора хаоса построен на классических генераторах на базе моста Вина. Мост Вина формирует на выходе синусоидальный сигнал с определенной частотой, которая изменяется резисторами R351, R353 и конденсаторами C160 и C163. Благодаря введению в генератор нелинейности на базе компараторов HS98 и HS99, на выходе с генератора Вина формируется синусоидальный сигнал с хаотическим изменением частоты, амплитуды и фазы сигнала. На рисунке 4.8 показаны математические модели генератора хаоса с Г-образным и Т-образным мостом Вина. Результаты моделирования генератора хаоса на Г-образном мосту Вина показаны на рисунке 4.9.

Изменяя параметры резисторов R368, R366, R365 можно регулировать спектр выходного сигнала. Достоинством данного генератора хаоса является его нечувствительность к разбросам параметров элементов по сравнению с

классическими схемами; а также возможность изменять спектральный состав в широком диапазоне.

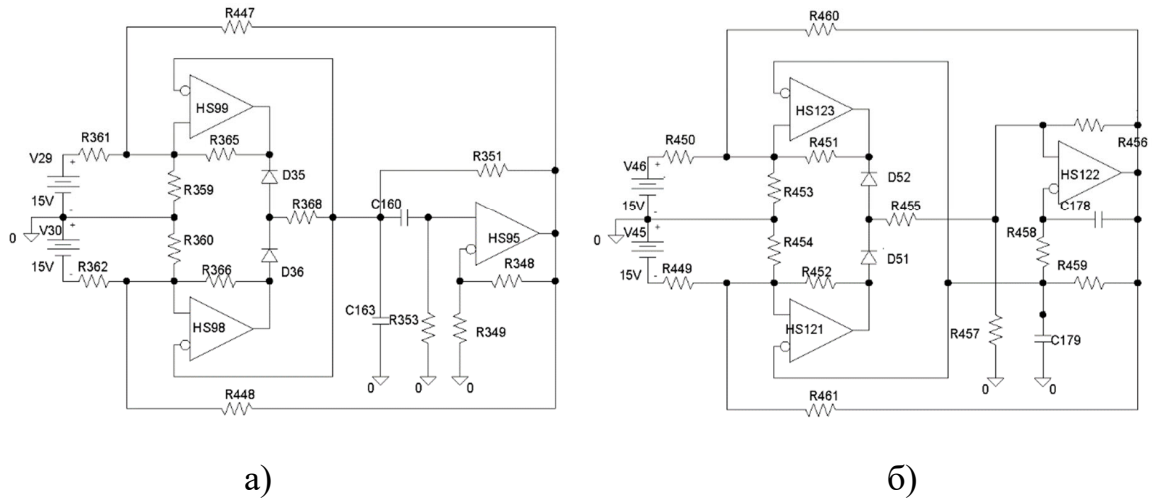


Рисунок 4.8 Математическая модель генератора хаоса на базе моста Вина (а – на базе Г-образного моста Вина, б – на базе Т-образного моста Вина)

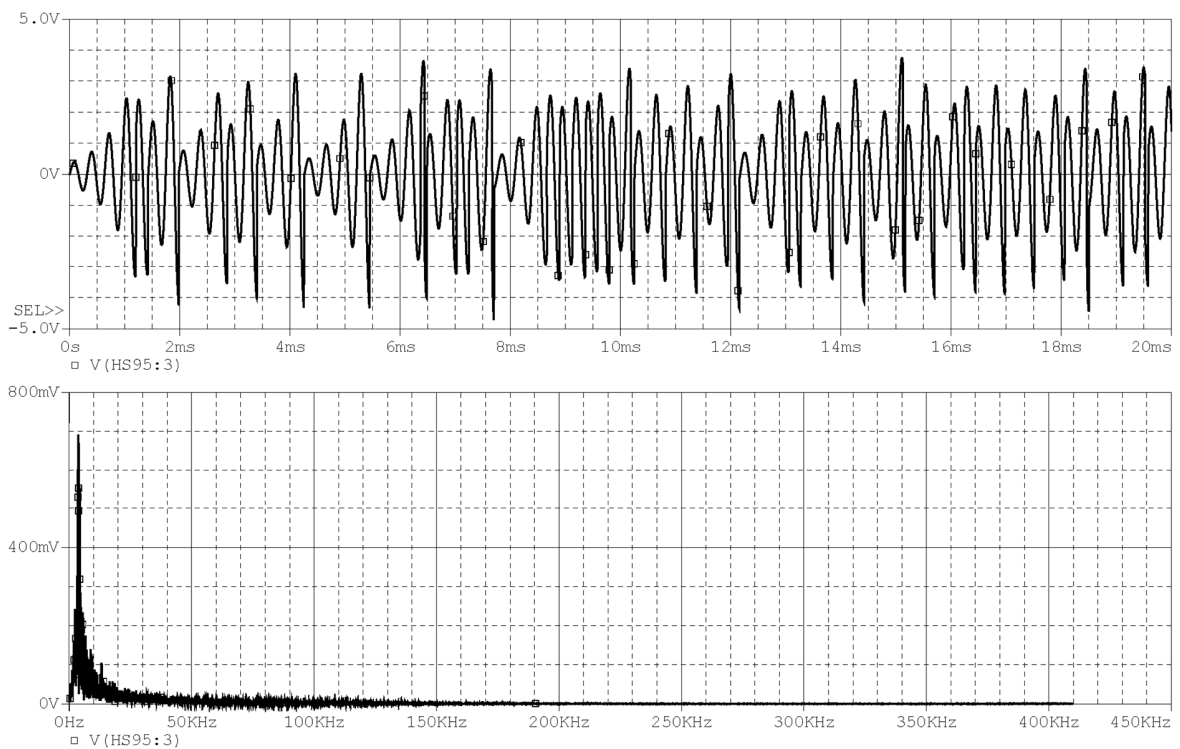


Рисунок 4.9 Выходной сигнал (вверху) генератора хаоса на базе Г-образного моста Вина и его спектр (внизу)

Рассмотренные генераторы хаоса, построенные с использованием D-триггеров, мультивибраторов, ГУНов или генераторов базы моста Вина, как уже было описано в их недостатках, требуют для моделирования своей работы существенных вычислительных ресурсов, что замедляет процесс имитационного компьютерного моделирования блоков распознавания и регистрации дуги и АЗК в целом. Данного недостатка лишен генератор хаоса на основе математического блока формирования хаотического сигнала (рисунок 4.10).

Для формирования хаотического сигнала в математическом блоке применяется нелинейный косинусный элемент. Управление спектральным составом выходного сигнала осуществляется коэффициентами k_1 и k_2 . Среди достоинств математического генератора хаоса можно выделить следующие:

- требует минимальное количество вычислительных ресурсов
- легко перенастраивается
- выходной сигнал настраивается в широком диапазоне

К недостаткам схемы можно отнести сложность её реализации на готовых элементах. Однако в рамках работ по математическому моделированию хаотического сигнала данный недостаток несущественен.

Результаты моделирования генератора хаоса на основе математического блока представлены на рисунке 4.11.

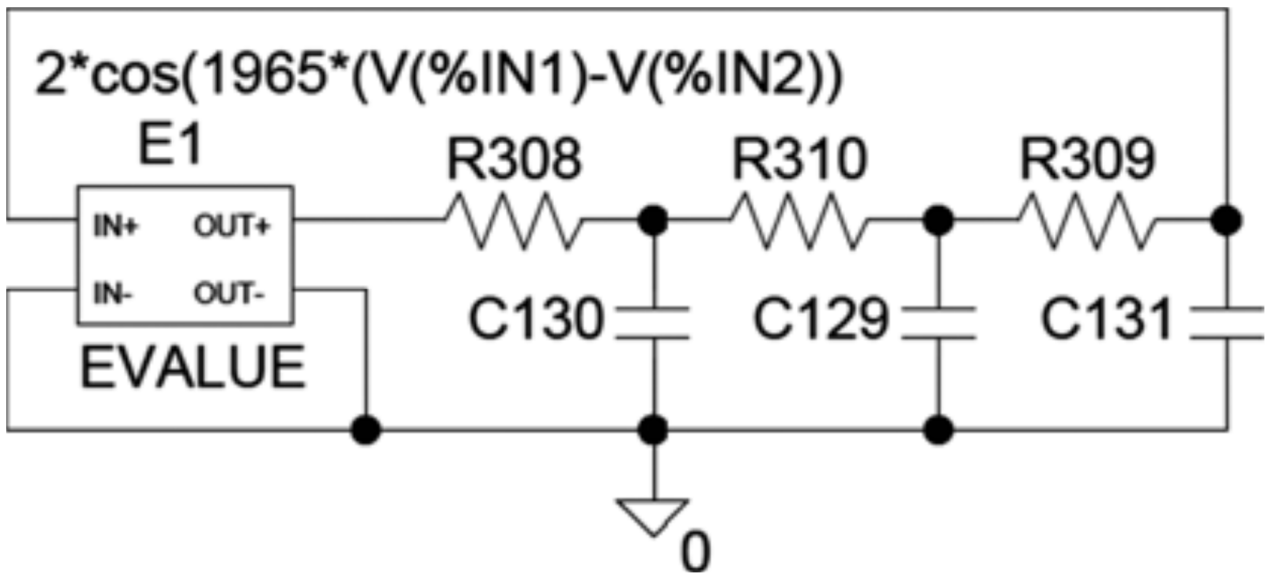


Рисунок 4.10 Математическая модель генератора хаоса на базе математического блока

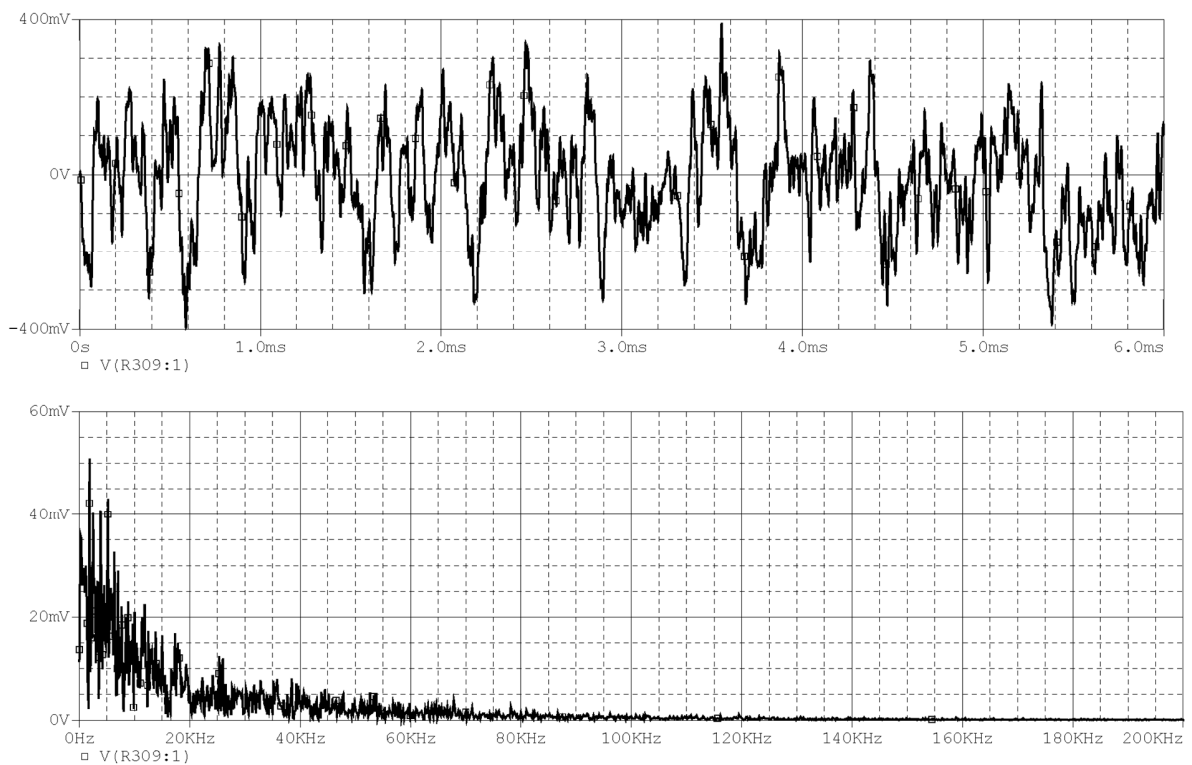


Рисунок 4.11 Результаты моделирования генератора хаоса на базе математического блока

4.1.2 К вопросу о генераторах хаоса и псевдохаоса

Хаотические сигналы удовлетворяют следующим свойствам:

- являются случайными, аperiodическими и нерегулярными сигналами с широкополосным непрерывным спектром;
- имеют нестационарные вероятностные характеристики, зависящие от временного сдвига случайным образом;
- являются источником информации о нерегулярности и нестационарности исследуемого процесса;
- амплитуды и фазы спектральных составляющих хаотического сигнала не являются постоянными, а непредсказуемо и беспорядочно меняются во времени (свойство амплитудной и фазовой нестабильности спектра);
- суперпозиция хаотического сигнала с любым другим сигналом является хаотическим сигналом;
- спектральные составляющие естественного хаотического сигнала подчиняются фликкер-эффекту;
- среднестатистическая нестационарность параметров хаотических сигналов сохраняется при изменении масштаба времени (свойство рекурсивности);
- любая выделенная полоса частот хаотического сигнала тоже является хаотическим сигналом.

Псевдохаотический сигнал – это сигнал, который удовлетворяет вышеуказанным свойствам только на определенном временном промежутке, то есть для некоторого продолжительного отрезка времени нарушается его первое свойство (aperiodичность).

Установить генераторами какого типа хаотического сигнала являются указанные в разделе 4.1.1 схемы не представляется возможным, поскольку требуется промоделировать работу их компьютерных моделей в течение

нескольких десятков секунд. В то же время, для решения поставленной в работе задачи важно, чтобы на протяжении только некоторого непродолжительного временного промежутка, за который происходит обнаружение и ликвидация аварийного дугового разряда, указанные генераторы выдавали хаотический сигнал.

Таким образом, в рамках решения поставленных задач указанные схемы генераторов ведут себя как источники гарантированного хаотического сигнала, о чем свидетельствуют результаты их компьютерного моделирования. Вопрос о принадлежности данных схем к генераторам хаоса или псевдохаоса не является задачей данного исследования.

Отметим, что величина временного промежутка (100 мс), на котором проводились исследования генераторов хаоса, выбрана с учетом требований зарубежных стандартов ко времени обнаружения и ликвидации аварийных дуговых разрядов.

Кроме того, разработан [60, стр.24] цифровой генератор хаотического сигнала, который выдает гарантированный хаос на заданном временном промежутке, продолжительность которого можно варьировать. Однако применение данной схемы генератора хаоса в рамках текущего исследования не рассматривалось ввиду исчерпывающего функционала генератора с точки зрения поставленных задач, высоких затрат вычислительных ресурсов и высокой вероятности возникновения проблем отсутствия сходимости при расчете компьютерной модели, а также сложности его реализации на этапе перехода к натурным испытаниям (~32 гибридные интегральные микросхемы (ГИС)) с целью отладки индикаторов дуги.

4.1.3 Имитационная компьютерная модель устройств синтеза временных диаграмм тока и напряжения последовательной дуги

Расчет математической модели транзисторного автомата защиты и коммутации с функцией гашения дуги требует значительных вычислительных ресурсов. Следовательно, для имитации хаотического шума, характерного для дугового разряда, целесообразнее применять генератор хаоса на основе косинусного нелинейного элемента.

На рисунке 4.12 представлена математическая модель сети переменного тока, в которой в определенный момент имитируется зажигание и горение последовательного дугового разряда. Ключ U9 в начальный момент времени замкнут, ток в цепи проходит по пути с наименьшим сопротивлением и схема, моделирующая дуговой разряд, не задействована. Через заданное время от начала моделирования ключ U9 размыкается, ток начинает протекать через цепь моделирования последовательного дугового разряда.

В основе модели последовательной дуги используется генератор хаоса, построенный на математическом блоке E6. Математический генератор хаоса позволяет существенно сократить время и ресурсы, затрачиваемые для расчета модели. Изменяя коэффициенты в генераторе хаоса, можно менять характеристики хаоса. Ключ U10 предназначен для включения генератора.

После замыкания ключа U10 на вход математического блока E5 поступает хаотический шум. Блок усиливает входной шум и добавляет к нему постоянную составляющую, таким образом, моделируется «полка» на графике напряжения в цепи, характерная для плазменной фазы горения последовательной дуги. Величина шума и высота «полки» настраиваются параметрами блока E5.

Математические блоки E7 и E8 отвечают за моделирование напряжения зажигания и гашения дуги соответственно. На осциллограмме напряжения

последовательной дуги видно, что его форма до зажигания дуги соответствует форме синусоидального напряжения сети. В модели ключ S2 в начальном состоянии заперт, напряжение сети передается в цепь нагрузки без изменений. Как только математические блоки E7 и E8 выдают команду, ключ S2 открывается и напряжение сети соответствует напряжению с математического блока E5, то есть постоянному напряжению с хаотическим шумом, соответствующим стадии плазменного горения дуги. В формулы математических блоков E7 и E8 добавлен параметр $V(aa)$, который является напряжением на выходе генератора хаоса. Таким образом, время коммутации ключа S2, а, следовательно, напряжение зажигания и гашения дуги, являются хаотическими величинами, что соответствует результатам проведенных экспериментов. Блок H3 является источником напряжения, управляемый ток, и предназначен для формирования сигнала для расчета блоком E8 момента замыкания ключа S2 для моделирования напряжения гашения дуги. Работа блока H3 при разомкнутом ключе объясняется тем, что открытое состояние ключа S2 моделируется сопротивлением с большим номиналом, таким образом, при разомкнутом ключе S2 в цепи продолжает течь ток очень малой величины. Диаграммы токов и напряжений математической модели дуги и диаграммы токов и напряжений, характерные для реальной дуги представлены на рисунке 4.13.

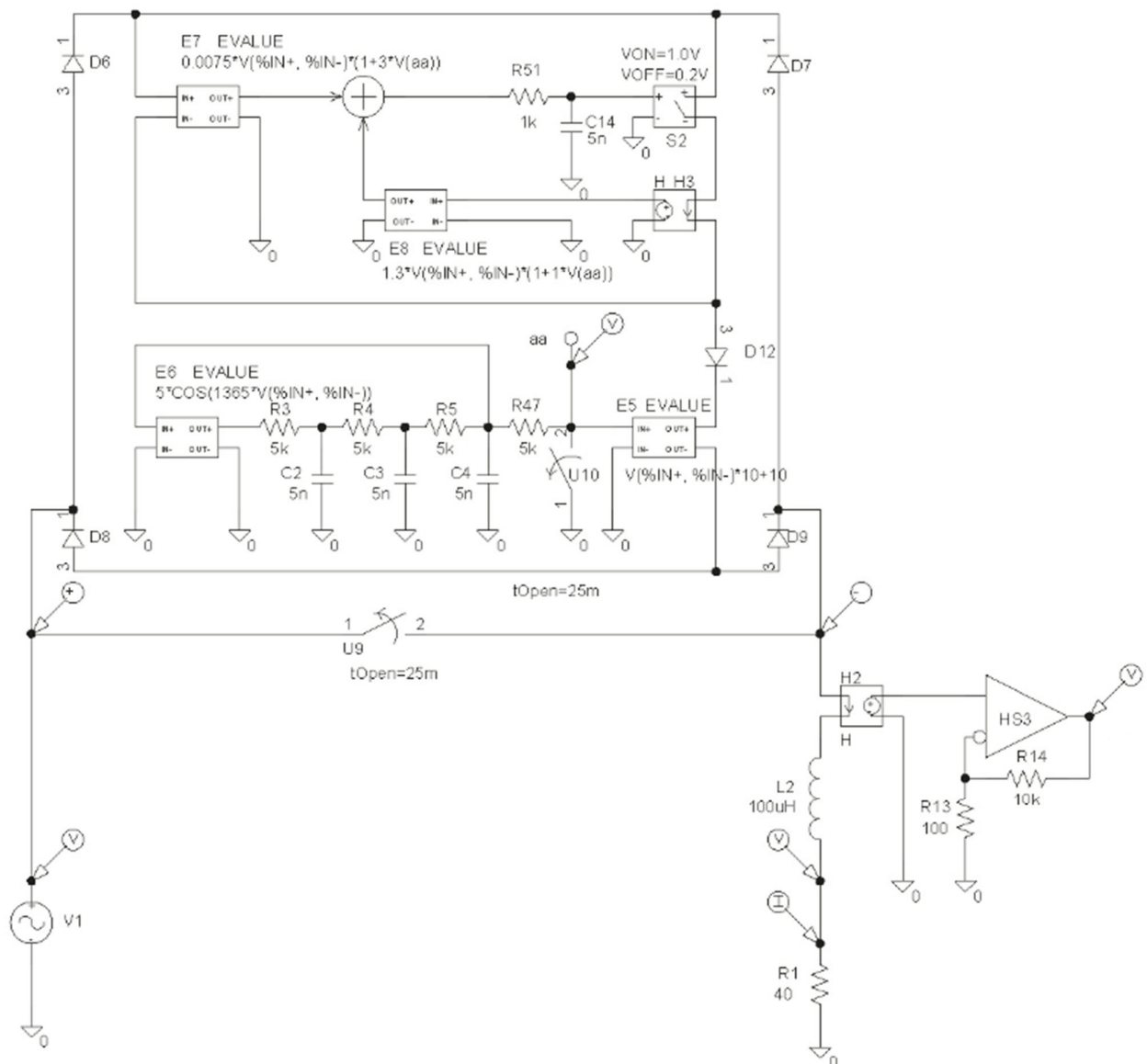


Рисунок 4.12 Математическая модель цепи, имитирующая зажигание и горение последовательного дугового разряда

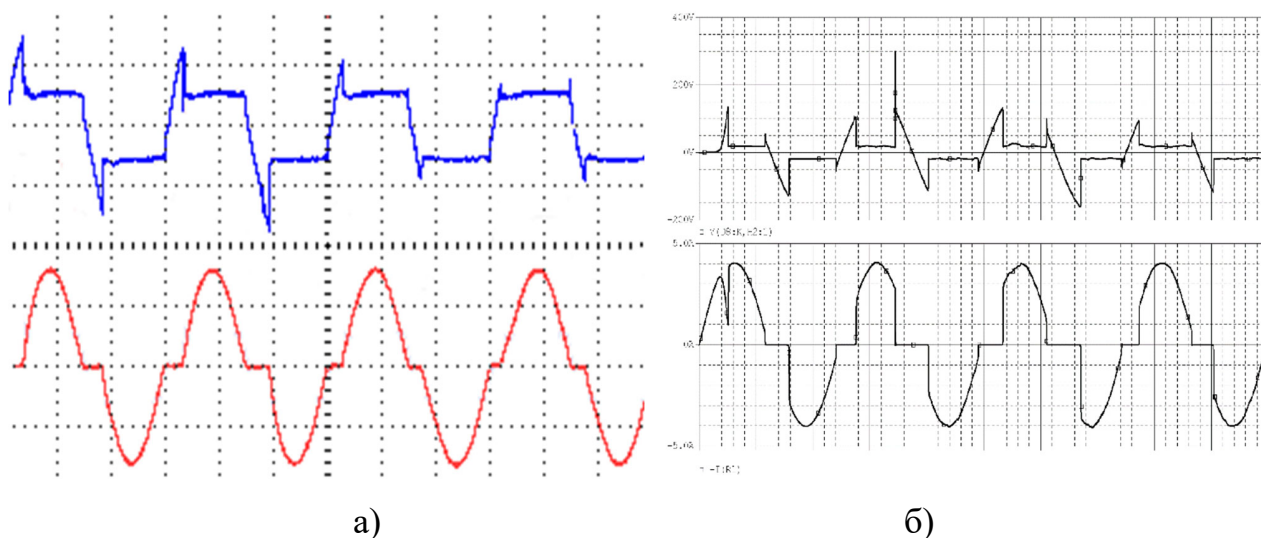


Рисунок 4.13 Диаграммы токов и напряжений при зажигании и горении дугового разряда (а – результаты исследования дуги на лабораторном стенде, б – результаты компьютерного моделирования)

На рисунке 4.13 отчетливо видно, что математическая модель горения дугового разряда (левый рисунок) имитирует все характерные особенности поведения тока и напряжения при горении реальной дуги. Различия в графиках тока и напряжения горения дуги для математической модели (левый рисунок) и для реального эксперимента сводится к отсутствию у последнего вертикальных скачков и пиков в каналах тока и напряжения, что обусловлено наличием паразитных емкостей и индукций в реальной схеме. Таким образом, математическая модель горения дуги позволяет разработать схемотехнические решения и провести отладку алгоритмов срабатывания для блоков распознавания и регистрации дуги с помощью имитационного компьютерного моделирования.

4.2 Структура и техническая реализация блоков обнаружения дуги.

Блок обнаружения дугового разряда входит в состав автомата защиты сети и предназначен для анализа сигнала тока и поиска отклонений в нем, характерных

для наличия последовательного дугового разряда в цепи. Конструктивно блок обнаружения дуги состоит из блока распознавания и регистрации.

В работе будут рассмотрены несколько способов построения блока распознавания дуги, в основу которого будут положены различные методы распознавания. На сегодняшний день разработано большое количество способов распознавания, ниже представлены наиболее распространенные из них:

- по наличию хаоса с помощью фазочастотного детектора;
- по наличию хаоса с помощью амплитудного детектора;
- по наличию хаоса с помощью детектора широтно-импульсной модуляции (ШИМ-детектора);
- по наличию хаоса с помощью амплитудно-частотного детектора;
- по уровню производной тока;
- по частоте повторений производной тока;
- по наличию скачков тока;
- по действующему значению тока.

Следует отметить, что моделирование работы блока распознавания дуги производится совместно с блоком регистрации дуги, структура которого остается неизменной. Таким образом, рассматриваемые способы обнаружения и регистрации дуги отличаются только структурой блока распознавания.

4.2.1 Распознавание дуги по наличию хаоса с помощью фазочастотного детектора.

Принцип действия блока распознавания дуги по наличию хаотического шума основан на том факте, что в любом хаотическом сигнале присутствует изменение его несущей частоты, фазы и амплитуды, которые являются аperiодическими и которые можно отследить, используя инерционное звено 2-го порядка.

Допустим, производится сравнение периодического сигнала без хаотического шума с точно таким же сигналом, пропущенным через инерционное звено 2-го порядка (со сдвигом фазы в 180°). Поскольку сигнал периодический, то частота прямого сигнала и пропущенного через фазовое звено не будет отличаться. Если во всем спектре хаотического сигнала выделить сигнал с определенной частотой и пропустить через инерционное 2-го порядка, то на выходе (за счет наличия изменений в частоте, фазе и амплитуде) частота данного сигнала будет отличаться от частоты сигнала на входе в фазовое звено. Таким образом, наличие фазочастотного детектора в блоке распознавания дуги и сравнение прямого сигнала с датчика тока с выходным сигналом инерционного звена 2-го порядка позволяет однозначно индицировать наличие хаотического шума в канале тока. Следовательно, однозначно индицировать наличие дугового разряда. С целью схемотехнической реализации блока распознавания дуги была выполнена имитационная компьютерная модель блока, представленная на рисунке 4.14.

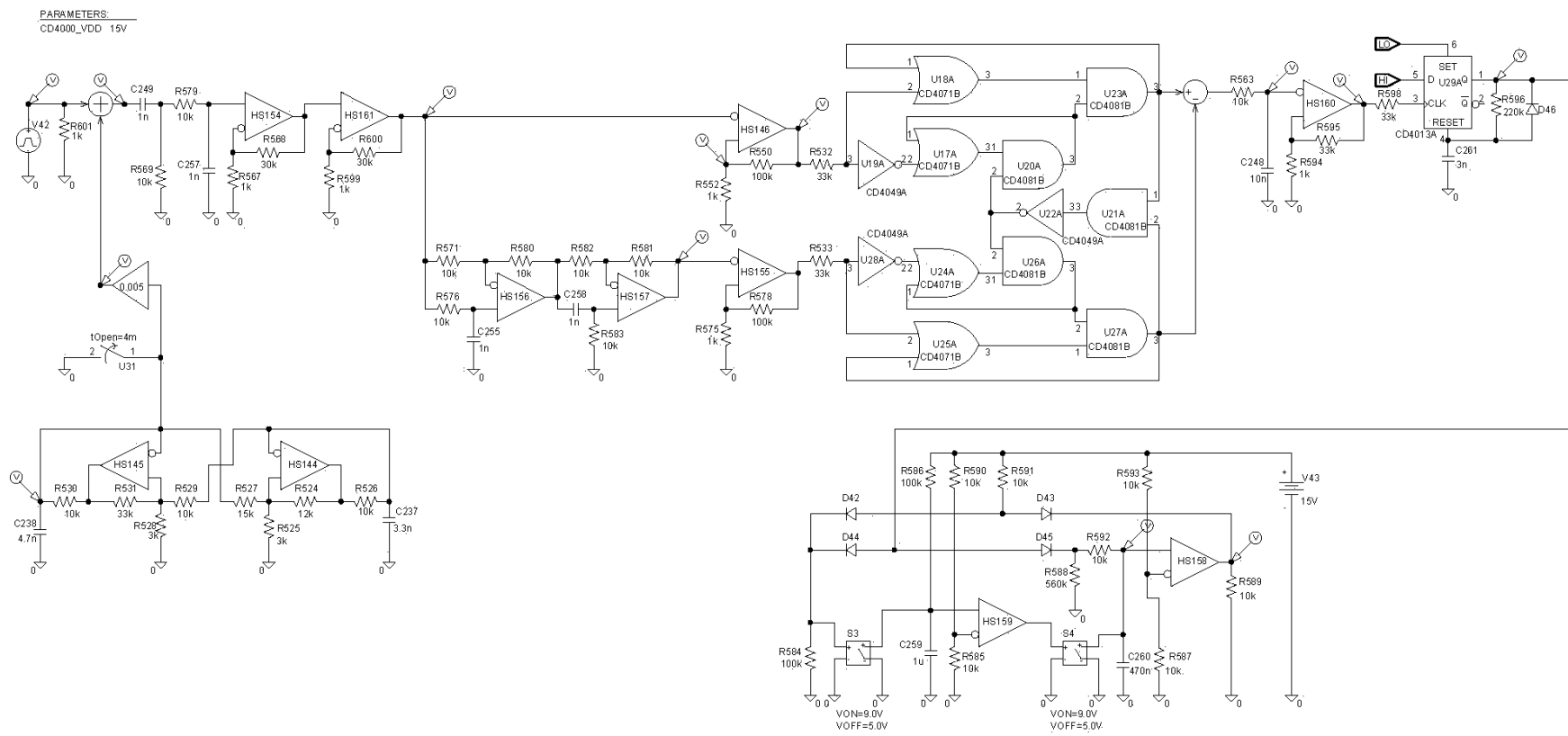


Рисунок 4.14 Имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги по наличию хаотического шума

В представленной схеме отсутствуют блоки формирования последовательного дугового разряда, так как они требуют значительных вычислительных мощностей для моделирования своей работы, а для проверки работоспособности данного метода распознавания достаточно наличие источника периодического сигнала и генератора хаоса. Источником периодического сигнала служит источник напряжения V42, который формирует меандр. Вместо меандра может быть использован источник синусоидального напряжения, на работу схемы это не влияет. Генератор хаоса построен на основе двух мультивибраторах (HS145, HS144) с перекрестной связью.

В состав блока распознавания дуги входят следующие части:

- полосо-пропускающий фильтр («окно прозрачности»), построенный на операционном усилителе (ОУ) HS154 и HS 161;
- фазовое звено 2-го разряда, построенное на ОУ HS156 и HS157;
- фазочастотный детектор, выполненный на основе логических элементов U19, U28, U16, U17, U20 – U27;
- фильтр низких частот, выполненный на основе конденсатора C248 и резистора R563;
- реле с гистерезисом на базе ОУ HS160;
- мультивибратор на триггере U29;
- интегратор.

Интегратор в схеме выполнен на базе нескольких ОУ (HS158, HS159) и обратных связей на линейных компонентах, позволяющих при отсутствии сигнала о наличии дуги сбросить счетчик интегратора. Задача интегратора состоит в подсчете количества импульсов, поступающих на вход. Как только число импульсов достигнет порогового значения, задаваемого резисторами R593, R587, интегратор формирует сигнал на отключение АЗК. Результаты моделирования работы схемы представлены на рисунке 4.15.

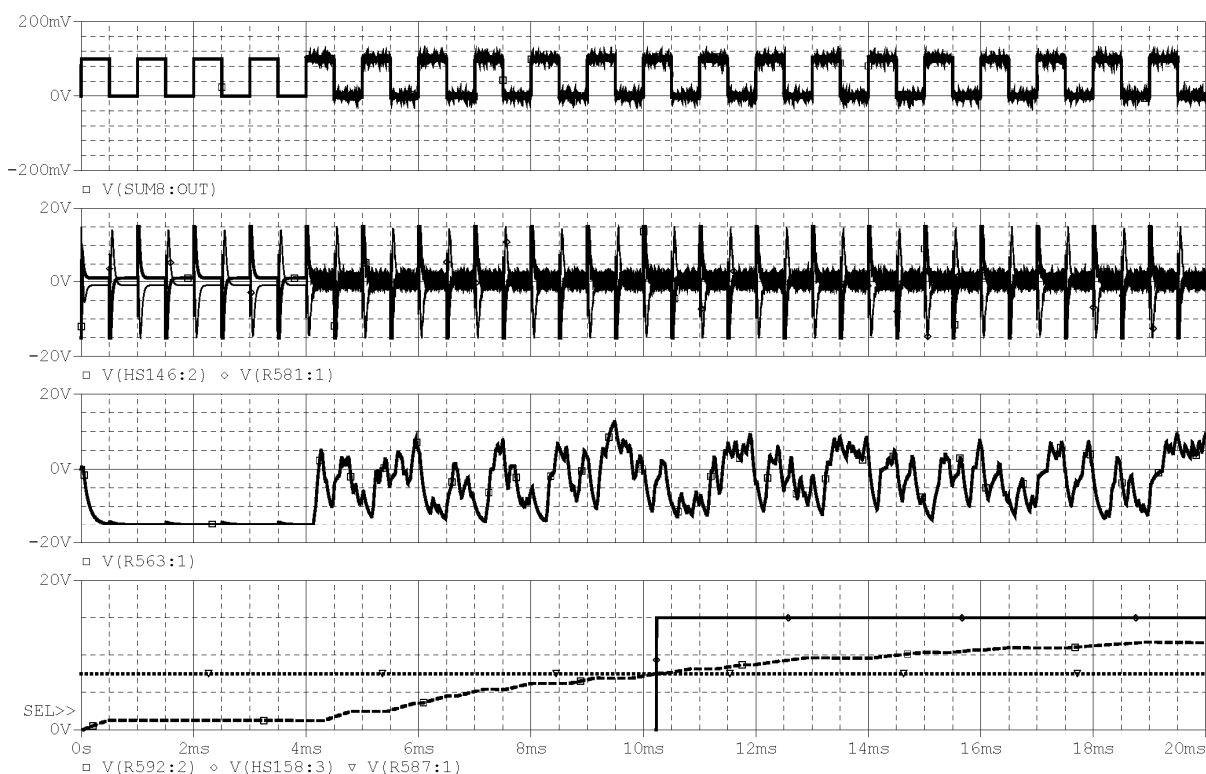


Рисунок 4.15 Результаты моделирования работы блока распознавания дуги

На графиках видно, что по истечении 4 мс. от начала моделирования начинается имитация горения дуги, а именно появляется хаотический шум, который является ключевым индикатором для блока распознавания. На графике 1 представлен периодический сигнал с наложенным хаотическим шумом. На графике 2 представлены сигналы с выхода полосо-пропускающего фильтра (прямой и прошедший через фазовое звено 2-го порядка). На графике 3 представлен сигнал на выходе фазочастотного детектора. Обращает внимание тот факт, что при отсутствии хаоса сигнал с фазочастотного детектора (ФЧД) является знакопостоянным. Как только в канале тока возникает хаос, сигнал с ФЧД становится знакопеременным, что вызывает работу одновибратора и интегратора. На графике 4 изображен сигнал с интегратора (штриховая линия), пороговый сигнал (точечная линия) и выходной сигнал с блока регистрации дуги. Отметим, что в течении 6 мс, пока идет работа фазочастотного детектора, сигнал на отключение АЗК в блоке регистратора не формируется, происходит подсчет

количества импульсов. При достижении порогового значения в 7В (задается резисторами R593, R587) происходит подача сигнала на отключение АЗК. Таким образом, конструкция блока регистрации дуги позволяет избежать ложных срабатываний.

4.2.2 Распознавание дуги по наличию хаоса с помощью амплитудного детектора

В хаотическом шуме присутствует широкий частотный спектр гармонических сигналов с разными весовыми коэффициентами, у которых с течением времени изменяются как амплитуда, так частота и фаза. Метод распознавания дуги по наличию хаоса с помощью АМ-детектора основан на сравнении амплитуд сигналов двух разных частот. При наличии хаоса, амплитуда обоих сигналов будет спонтанно изменяться, следовательно при постоянно будут резонировать разные сигналы. При подаче одного сигнала на положительный вход схемы, а другого – на отрицательный выходной сигнал будет знакопеременным. При отсутствии хаоса амплитуда обоих сигналов не будет изменяться хаотически выходной сигнал схемы будет знакопостоянным. Имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги по наличию хаоса с помощью АМ-детектора представлена на рисунке 4.16.

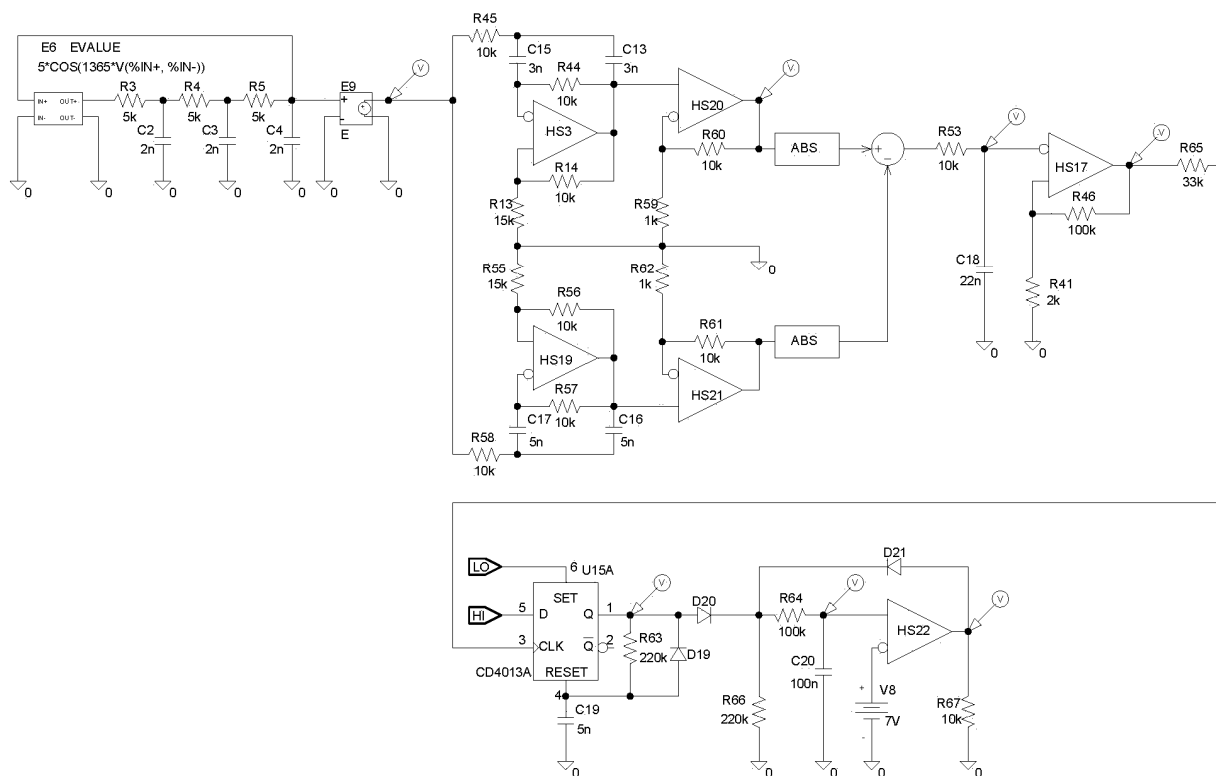


Рисунок 4.16 Имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги по уровню производной тока

Поскольку блок распознавания дуги реагирует только на наличие хаоса, в схеме присутствует только генератор хаоса и отсутствуют блоки имитации перенапряжений характерных для дуги. Датчик тока имитирован источником напряжения, регулируемый током, (элемент E2). Сигнал с датчика тока раздваивается на два полосо-пропускающих фильтра (ППФ) (один на ОУ HS3 и HS20, другой – на ОУ HS19 и HS21), каждый из которых настроен на свою частоту. Выходной сигнал с каждого ППФ проходит через арифметический оператор «модуль» и попадает на арифметический оператор «вычитание». На выходе арифметического оператора расположен компаратор с петлей гистерезиса (чтобы уменьшить влияние помех). Выход с компаратора подключен к одновибратору, далее через интегратор на схему, формирующую выходной положительный сигнал на отключение АЗК при достижении результата интегрирования определенного

уровня, задающегося источником напряжения V8. Результаты моделирования работы схемы представлены на рисунке 4.17.

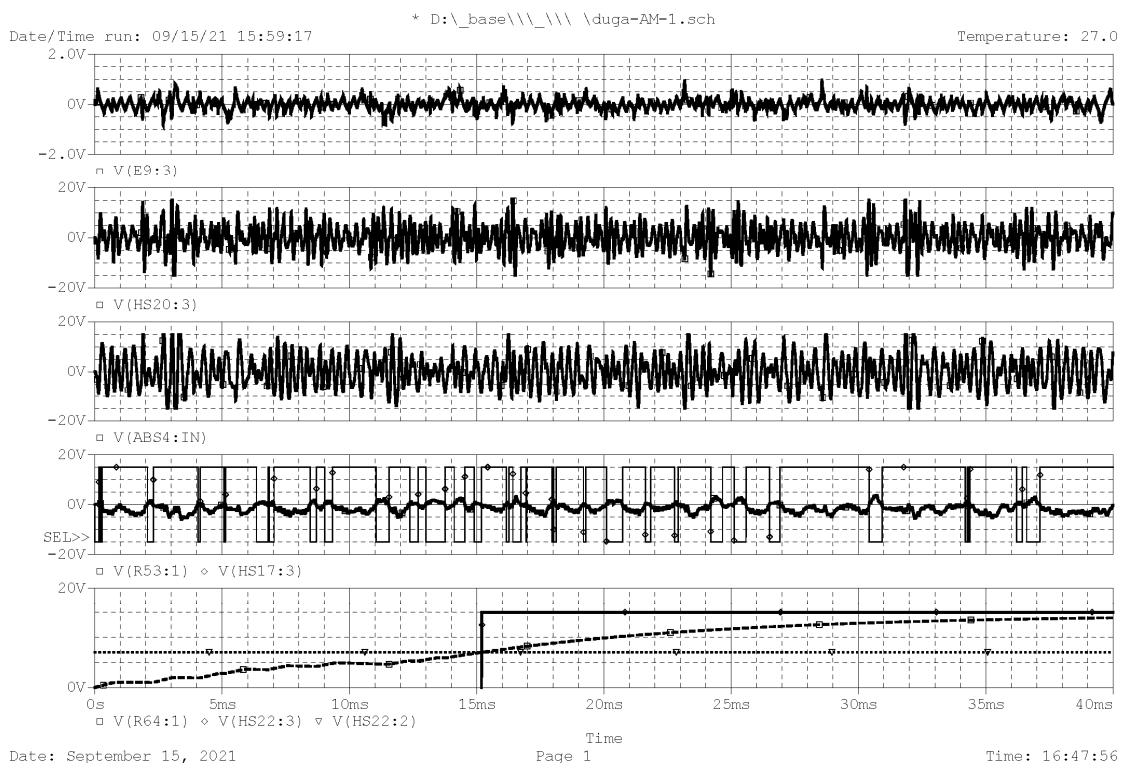


Рисунок 4.17 Результаты моделирования работы блока распознавания дуги

График 1 показывает сигнал с генератора хаоса, на котором отчетливо наблюдается наличие хаотического шума. График 2 и 3 показывает сигналы на выходе с полосо-пропускающих фильтров 1 и 2. Сигналы имеют разную частоту, но также наблюдается хаотическое изменение их параметров. На графике 4 изображен выходной сигнал, прошедший арифметический оператор «модуль» и арифметический оператор «вычитание». Очевидно, что сигнал является знакопеременной функцией, что характерно только для хаотического сигнала на входе. Второй сигнал – сигнал с выхода компаратора, оборудованного петлей гистерезиса. На графике 5 изображен сигнал с интегратора (штриховая линия), пороговый сигнал (точечная линия) и выходной сигнал с блока регистрации дуги,

который подается в схему управления при наличии дугового разряда. Отметим, что в течение 15 мс, пока идет хаотический сигнал, сигнал на отключение АЗК в блоке регистратора не формируется, а происходит подсчет количества импульсов. Только по достижении порогового значения в 7 В происходит подача сигнала на отключение АЗК. Таким образом, конструкция блока регистрации дуги позволяет избежать ложных срабатываний.

4.2.3 Распознавание дуги по наличию хаоса с помощью ШИМ-детектора

Метод распознавания последовательного дугового разряда по хаотическим шумам с помощью ШИМ-детектора работает следующим образом. При наличии входного сигнала с датчика тока без хаоса время импульса и время паузы четко регламентировано и заранее известно. Хаотический шум вносит дополнительные сигналы в канал тока с небольшой амплитудой, но с более высокими плавающими частотами. Таким образом, если выделить из сигнала тока хаотический шум и пропустить через ШИМ-детектор, то на выходе будет сформирован сигнал с частотой и коэффициентом заполнения существенно большим, чем у базового сигнала с датчика тока без хаотического шума. Имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги с помощью ШИМ-детектора представлена на рисунке 4.18.

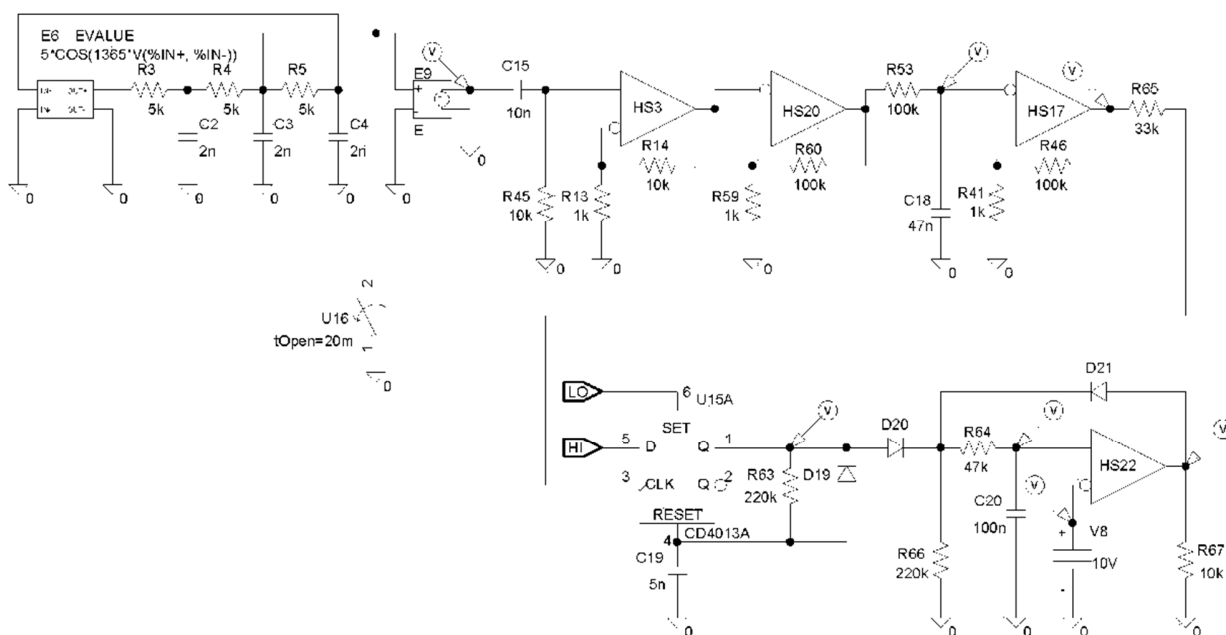


Рисунок 4.18 Имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги по хаотическому шуму с помощью ШИМ-детектора

В представленной схеме отсутствуют блоки формирования последовательного дугового разряда, так как для проверки работоспособности данного метода распознавания дуги достаточно наличие только генератора хаоса. Генератор хаоса построен на основе математического генератора с нелинейным косинусным элементом.

В состав блока распознавания дуги входят следующие части:

- дифференциатор с неинвертирующим усилителем, построенный на конденсаторе C15, резисторе R45 и ОУ HS3;
- два усилителя с петлей гистерезиса на ОУ HS20 и HS17;
- фильтр низких частот на базе конденсатора C18 и резистора R53;
- одновибратор на триггере U15;
- интегратор импульсов на базе диода D20, конденсатора C20 и резисторах R64 и R66, совмещенных с формирователем сигнала на отключение АЗК на ОУ HS22.

Нормально-замкнутый ключ U16 предназначен для включения генератора хаоса в строго заданное время от начала моделирования. В начальный момент времени ключ замкнут, выход с генератора хаоса соединен с землей, на вход блока распознавания хаотический шум не подается. Спустя заданное время ключ размыкается, таким образом реализована подача на вход блока распознавания дуги хаотического шума.

Положительный выходной сигнал с ОУ HS22 на отключение АЗК формируется при достижении результата интегрирования определенного уровня, задающегося источником напряжения V8. Результаты моделирования работы схемы представлены на рисунке 4.19.

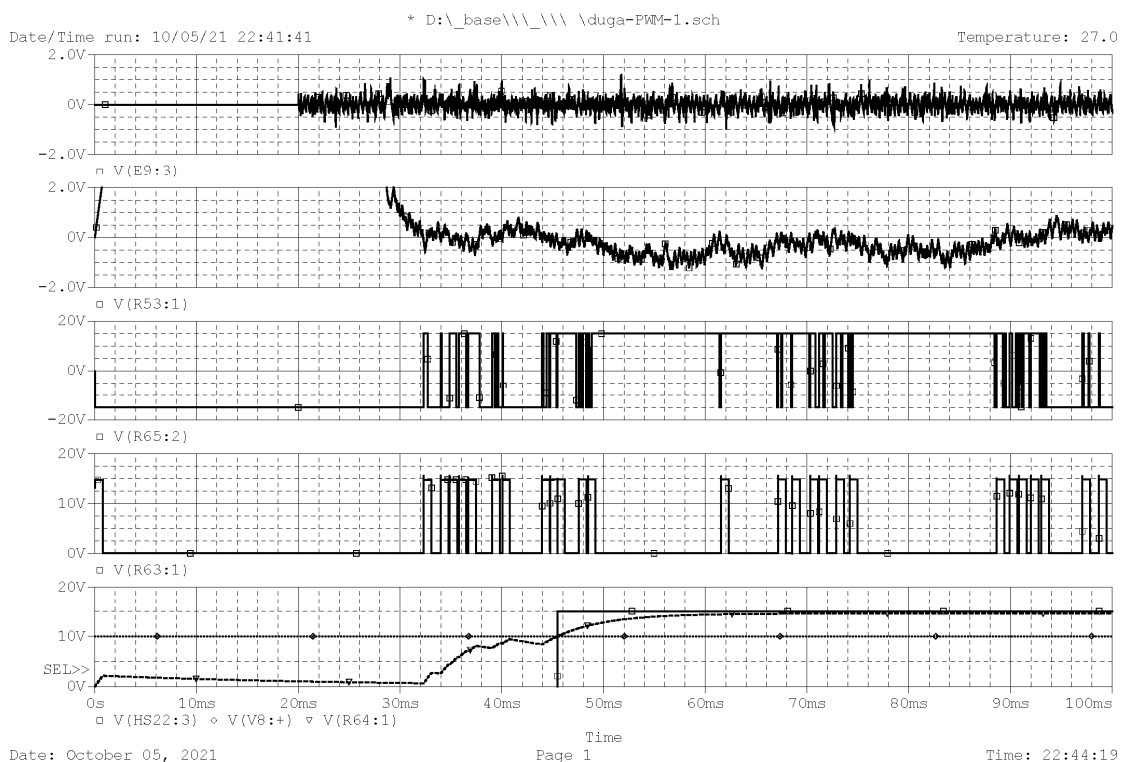


Рисунок 4.19 Результаты моделирования работы блока распознавания дуги

На графиках видно, что генератор хаоса начинает свою работу через 20 мс от начала расчета. График 1 показывает сигнал с генератора хаоса, на котором

отчетливо наблюдается наличие хаотического шума. График 2 и 3 показывает сигналы на выходе с дифференциатора и усилителя с петлей гистерезиса. Сигналы являются знакопеременными и имеют частоту и коэффициент заполнения отличный от сигнала с датчика тока без хаоса. На графике 4 изображен выходной сигнал с компаратора, оборудованного петлей гистерезиса. На графике 5 изображен сигнал с интегратора (штриховая линия), пороговый сигнал (точечная линия) и выходной сигнал с блока регистрации дуги, который подается в схему управления при наличии дугового разряда. Отметим, что в течение 25 мс, пока идет хаотический сигнал, сигнал на отключение АЗК в блоке регистратора не формируется, а происходит подсчет количества импульсов. Только по достижении порогового значения в 10 В происходит подача сигнала на отключение АЗК. Таким образом, конструкция блока регистрации дуги позволяет избежать ложных срабатываний.

4.2.4 Распознавание дуги по наличию хаоса с помощью АЧ-детектора

Метод распознавания дуги по хаотическим шумам на основе АЧ-детектора основан на сравнении двух сигналов, прошедших через фазовые звенья 2-го порядка с разными характеристиками. При отсутствии хаоса данные сигналы будут изменяться с одинаковой частотой, но с разными фазами. Дифференциал от их суммы будет знакопостоянной функцией. При наличии хаоса, возникает смещение частот сигнала с датчика тока при прохождении через фазовое звено, таким образом, сигналы, прошедшие через фазовые звенья 2-го порядка с разными характеристиками, будут изменяться не только с разной фазой, но и с разной частотой. Дифференциал суммы данных сигналов будет знакопеременной функцией, он является показателем наличия хаотического шума в цепи тока. С целью схемотехнической реализации блока распознавания дуги была выполнена

имитационная компьютерная модель блока, представленная на рисунке 4.20.
 Результаты моделирования работы схемы представлены на рисунке 4.21.

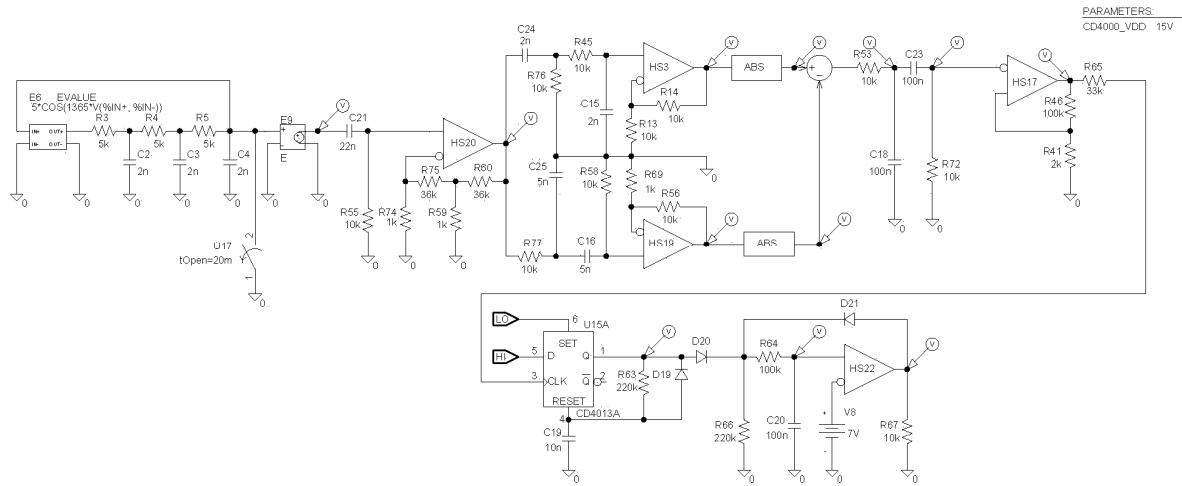


Рисунок 4.20 Имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги по уровню производной тока

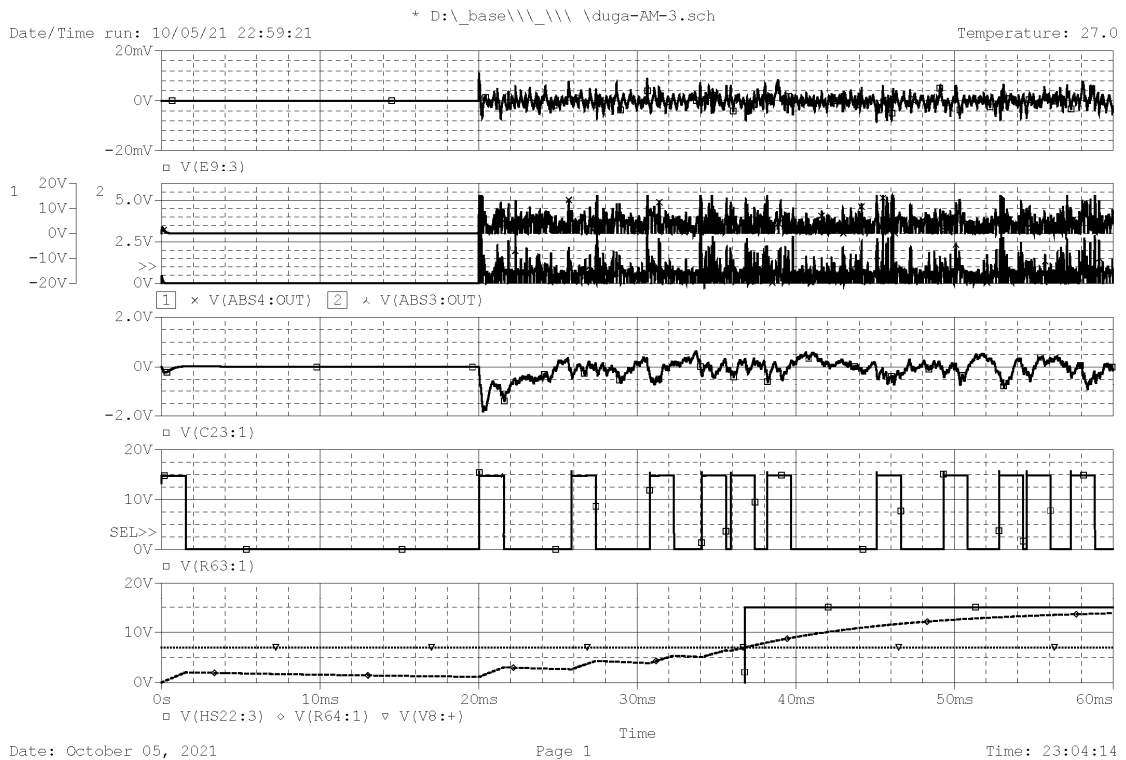


Рисунок 4.21 Результаты моделирования работы блока распознавания дуги

На графиках видно, что генератор хаоса начинает свою работу через 20 мс от начала расчета. График 1 показывает сигнал с генератора хаоса, на котором отчетливо наблюдается наличие хаотического шума. График 2 показывает сигналы на выходе с фазовых звеньев 2-го порядка, прошедшие математический блок «модуль». Сигналы являются знакопостоянными и проходят через сумматор. На графике 3 изображен выходной сигнал с дифференциатора, который берет дифференциал с суммы графиков, прошедших через фазовое звено. При отсутствии хаоса сигналы с обоих фазовых звеньев будут изменяться с одинаковой частотой, но с разными фазами. При этом дифференциал с этих сигналов будет знакопостоянным сигналом. При наличии хаоса, сигналы будут изменяться с колеблющейся частотой, их дифференциал будет знакопеременным, что и наблюдается на графике 3. На графике 4 изображен сигнал с компаратора, оборудованного петлей гистерезиса. На графике 5 изображен сигнал с интегратора (штриховая линия), пороговый сигнал (точечная линия) и выходной сигнал с блока регистрации дуги, который подается в схему управления при наличии дугового разряда. Отметим, что в течение 15 мс, пока идет хаотический сигнал, сигнал на отключение АЗК в блоке регистратора не формируется, а происходит подсчет количества импульсов. Только по достижении порогового значения в 10 В происходит подача сигнала на отключение АЗК. Таким образом, конструкция блока регистрации дуги позволяет избежать ложных срабатываний.

4.2.5 Распознавание дуги по уровню производной тока.

Метод распознавания дуги основан на том факте, что возникновение в цепи последовательного дугового разряда сопровождается резким (наличие пиков), иногда скачкообразным изменением тока на данном участке. Поскольку скорость изменения тока отражает его производная, то в момент возникновения и горения дугового разряда величина производной тока будет существенно выше, чем при штатной работе сети. Стоит отметить, что любая нагрузка переменного тока в своем

составе имеет на входе сглаживающий фильтр, поэтому при подключении обычных нагрузок в цепи переменного тока не будут возникать резкие скачки dI/dt . Если в сети наблюдаются скачки dI/dt , то это однозначный признак возникновения дугового разряда. С целью схемотехнической реализации блока распознавания дуги была выполнена имитационная компьютерная модель блока, представленная на рисунке 4.22.

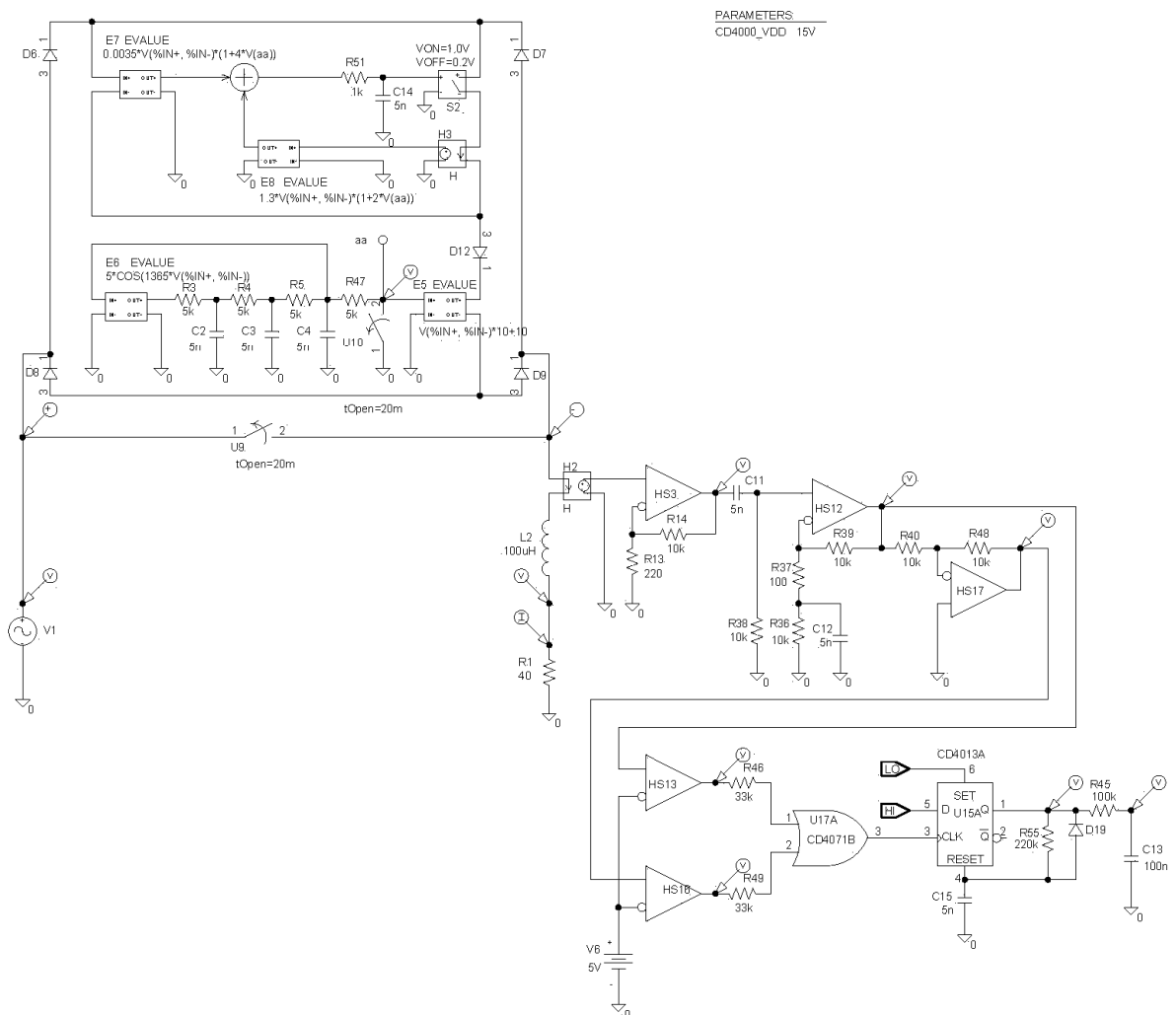


Рисунок 4.22 Имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги по уровню производной тока

В схеме датчика тока имитирован источником напряжения, регулируемый ток, (элемент Н2). Сигнал с датчика тока проходит через инвертирующий

усилитель на операционном усилителе HS3, задача которого усиливать сигнал с датчика тока. К выходу усилителя подключен дифференциатор на ОУ HS12. Дифференциатор HS12 формирует сигнал производной по току с положительным знаком, который поступает на компаратор HS13. На компаратор HS16 поступает сигнал с дифференциатора, но через инвертирующий усилитель на ОУ HS17, таким образом, формируется сигнал производной по току с отрицательным знаком.

Компараторы HS13 и HS16 выполняют функцию фильтра, и формируют на своем выходе сигнал высокого уровня только при превышении сигналов с дифференциатора определенного порогового значения. Порог срабатывания задается источником напряжения V6.

Выход компараторов HS13 и HS16 суммируется микросхемой CD4017 и подается на вход одновибратора U15A, выполненный на схеме CD4013A. Задача одновибратора состоит в увеличении продолжительности импульсов на входе с нескольких десятков микросекунд, которых недостаточно для корректного срабатывания, до нескольких сотен миллисекунд.

В рассматриваемой схеме к выходу одновибратора подключен резистор для отслеживания его входного сигнала. Однако также можно подключить и блок регистрации, который построен на интеграторе сигналов (схема блока будет показана позднее). Задача интегратора в таком случае будет состоять в подсчете количества импульсов на входе, и, как только число импульсов достигнет определенного уровня, сформировывать сигнал на отключение АЗК по уровню производной по току. Результаты моделирования работы схемы представлены на рисунке 4.23.

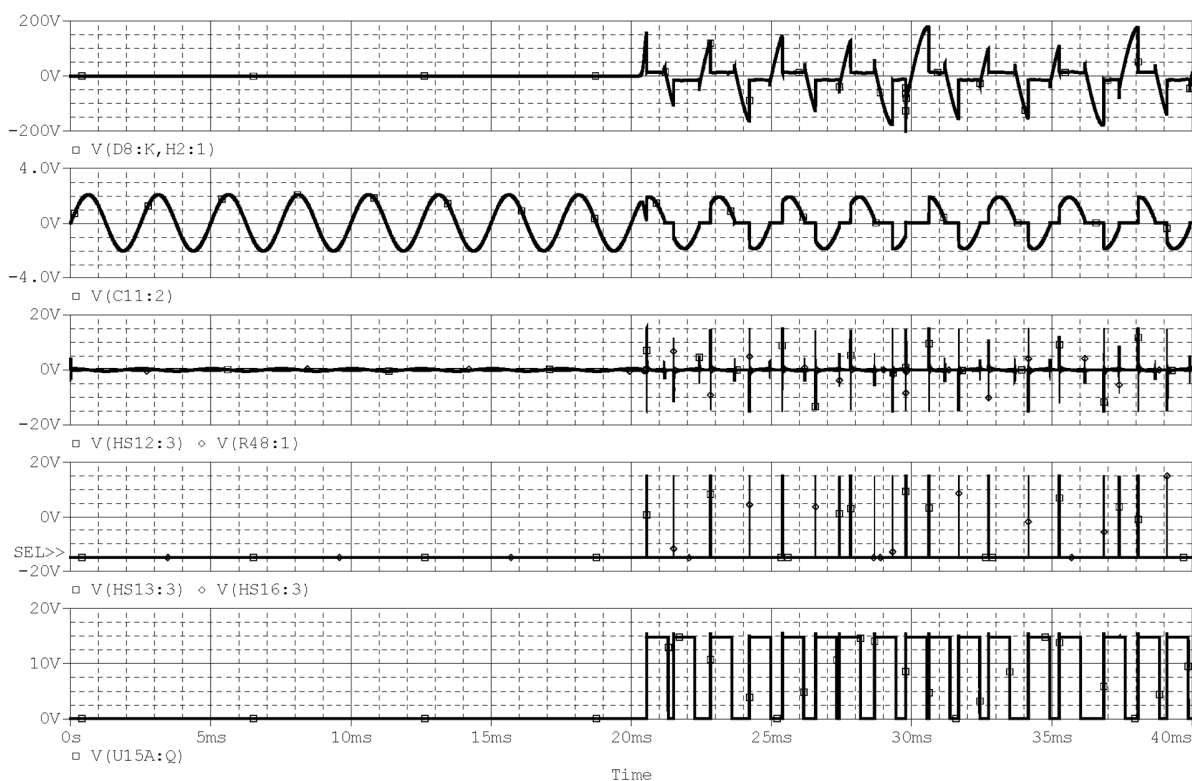


Рисунок 4.23 Результаты моделирования работы блока распознавания дуги

На графиках видно, что по истечении 20 мс. от начала моделирования происходит разрыв цепи ключом U9 и начинается имитация горения дуги. График 1 и 2 показывают напряжение и ток в цепи на участке, где имитируется дуга при нормальной работе и при возникновении дугового разряда. Сигнал производной тока с положительным и отрицательным знаками, который формируется на выходе с дифференциатора, представлен на графике 3. На графике 4 представлен отфильтрованный сигнал дифференциатора. Следует отметить, что при отсутствии в сети дугового разряда на графике 4 присутствует ноль (хотя на выходе с дифференциатора значение не равно нулю). График 5 – выходной сигнал с одновибратора.

4.2.6 Распознавание дуги по частоте повторений производной тока.

Метод распознавания дуги по частоте повторений производной тока базируется на сравнении частоты тока с частотой его производной. В цепи, в которой отсутствует дуговой разряд, частота производной тока всегда равна частоте тока. При возникновении дугового разряда ток в цепи начинает скачкообразно изменяться, таким образом, частота производной по току будет отличаться от частоты тока (будет в 2-4 раза выше). Данное отклонение частоты производной тока и отслеживает блок распознавания дуги по частоте повторений производной тока, имитационная компьютерная модель которого представлена на рисунке 4.24.

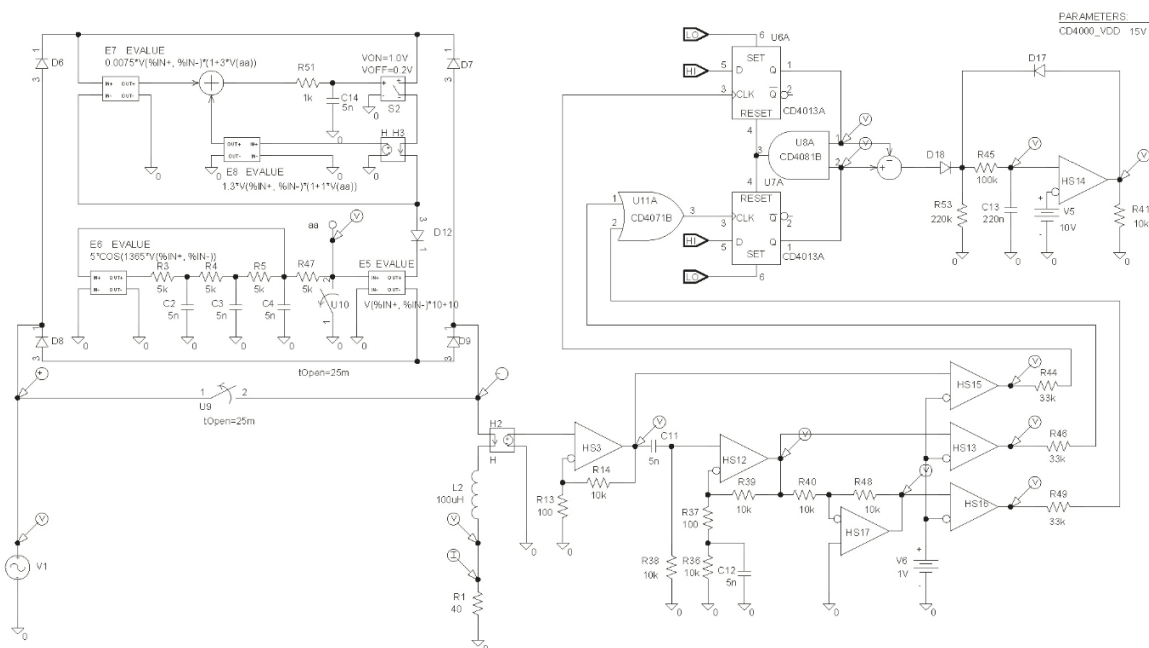


Рисунок 4.24 Имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги по уровню производной тока

В схеме датчик тока имитирован источником напряжения, регулируемый ток, (элемент H2). К выходу датчика тока подключается не инвертирующий усилитель на ОУ HS3. Он необходим для того, чтобы отслеживать любые небольшие скачкообразные изменения тока. Выходной сигнал с усилителя

раздваивается и подается на компаратор HS15 и дифференциатор на базе ОУ HS12. Выход с дифференциатора подключается к компаратору HS13 и к инвертирующему усилителю на базе ОУ HS17, который имитирует вычислитель производной тока с отрицательным знаком.

Компараторы HS15, 13, 16 являются фильтрами, которые регулируют чувствительность блока распознавания дуги. Порог чувствительности задается источником напряжения V6. Как только сигнал с датчика тока становится больше порогового уровня блок распознавания дуги включается, сигнал с датчика тока, а также его производные с положительным и отрицательным знаками, поступают на вход фазочастотного детектора.

Фазочастотный детектор считывает частоту входящих сигналов. При совпадении частоты сигнала по току с частотой сигнала производной тока на выходе фазочастотного детектора формируется логический ноль. Если частота сигнала производной тока будет отличаться от частоты сигнала по каналу тока, то на выходе фазочастотного детектора формируется логическая «1», которая сигнализирует о наличии в цепи тока дугового разряда.

К выходу фазочастотного детектора подключен интегратор на диоде D18, конденсаторе C13 и резисторах R45 и R53. Задача интегратора состоит в подсчете количества импульсов, поступающих на вход. Как только число импульсов достигнет десяти, интегратор формирует сигнал на отключение АЗК. Следует отметить, что конструкция интегратора подразумевает автоматическое обнуление счетчика, при отсутствии входных сигналов с течением времени. Результаты моделирования работы схемы представлены на рисунке 4.25.

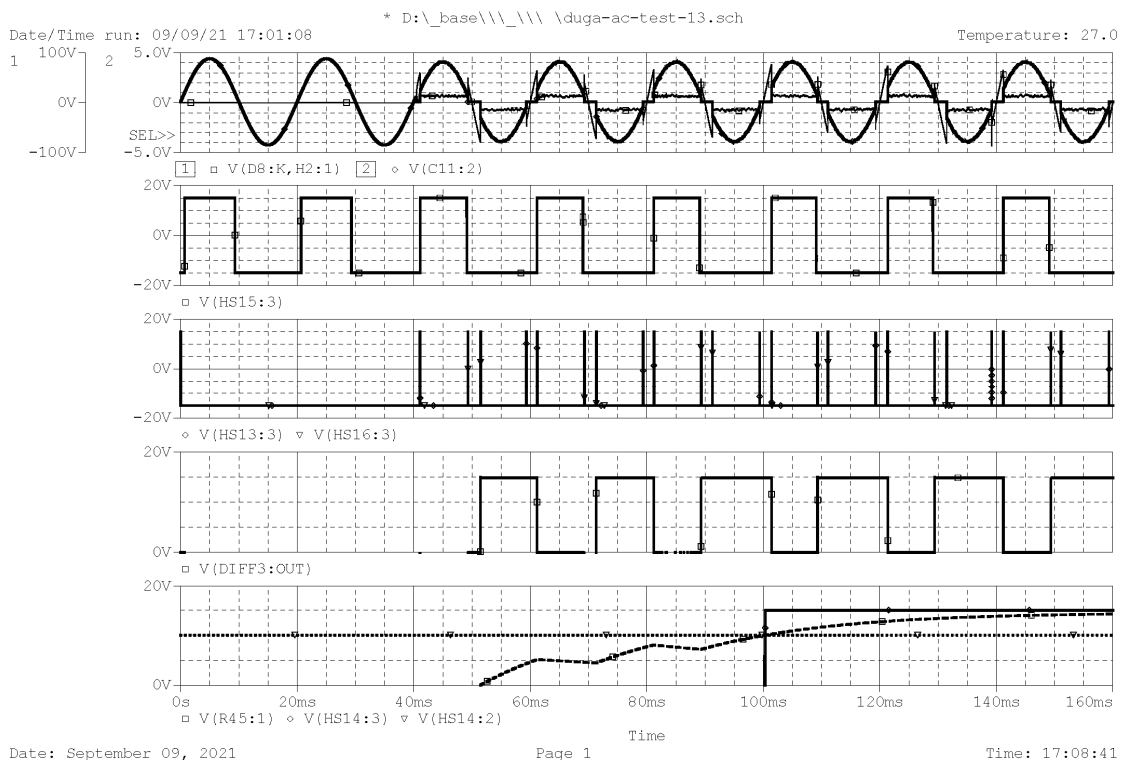


Рисунок 4.25 Результаты моделирования работы блока распознавания дуги

На графиках видно, что по истечении 40 мс. от начала моделирования происходит разрыв цепи ключом U9 и начинается имитация горения дуги. График 1 показывает напряжение и ток в цепи на участке, где имитируется дуга при нормальной работе и при возникновении дугового разряда. График 2 – сигнал на выходе компаратора HS15 с частотой, равной частоте тока. Частота сигнала на выходе компараторов HS13, HS16 равна частоте сигналов производной тока с положительным и отрицательным знаком. На графике 4 представлен сигнал на выходе фазочастотного детектора. Отметим, что на выходе формируется положительный сигнал только в том случае, когда частота производной тока отличается от частоты тока. На графике 5 изображен сигнал с интегратора (штриховая линия), пороговый сигнал (точечная линия) и выходной сигнал с блока регистрации дуги, который подается в схему управления при наличии дугового

разряда. Отметим, что в течение 50 мс, пока идет работа фазочастотного детектора, сигнал на отключение АЗК в блоке регистратора не формируется, а происходит подсчет количества импульсов. Только по достижении порогового значения в 10 В (100 мс) происходит подача сигнала на отключение АЗК. Таким образом, конструкция блока регистрации дуги позволяет избежать ложных срабатываний.

4.2.7 Распознавание дуги по наличию скачков тока

В основу метода распознавания дуги по скачкам тока положен аналогичный способ, что и в методе распознавания дуги по уровню производной тока, но схемотехническая реализация метода распознавания дуги по скачкам тока выполнена проще, так как отсутствует блок дифференцирования на базе операционного усилителя.

Наличие дифференциатора на базе операционного усилителя делает схему очень помехочувствительной, что повышает вероятность возникновения ложного срабатывания. При этом следует отметить, что при возникновении дуги производные по току имеют достаточно большие значения, уровни которых могут быть распознаны без использования дифференциатора на базе операционного усилителя. С целью схемотехнической реализации блока распознавания дуги была выполнена имитационная компьютерная модель блока, представленная на рисунке 4.26.

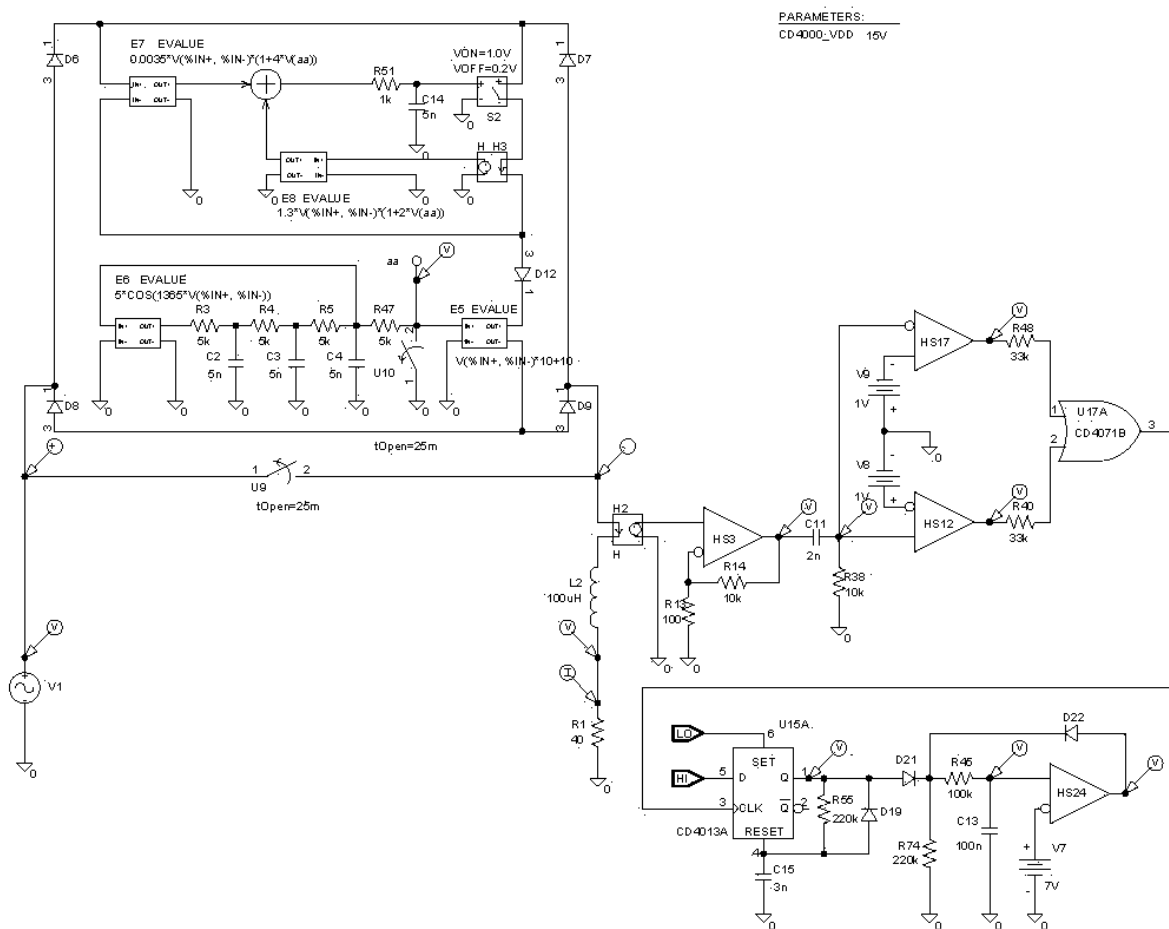


Рисунок 4.26 Имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги по скачкам тока

В схеме, как и в предыдущих методах, датчик тока имитирован источником напряжения, регулируемый ток, (элемент H2). К выходу датчика тока подключен не инвертирующий усилитель на базе операционного усилителя HS3, так как блок анализирует любые небольшие скачкообразные изменения тока. Для фильтрации сторонних сигналов и выделения высокого сигнала производной тока на входе не инвертирующего усилителя ставится RC-цепь (с передаточной функцией $\frac{Ts}{Ts+1}$), состоящая из резистора R38 и конденсатора C11.

К выходу RC-цепи подключаются компараторы HS12 и HS17, которые формируют логические сигналы высокого уровня при резком изменении тока (высоком значении производной dI/dt). HS12 – регистрирует резкий скачок тока для

положительных полуволн, HS17 – для отрицательных полуволн. Длительность выходных сигналов с компараторов HS12 и HS17 не превышает 50 мкс. Данной продолжительности импульсов недостаточно для корректной работы блока регистрации дуги, поэтому выходы компараторов HS12, HS17 соединены со входом одновибратора U15A (построенном на микросхеме CD4013), задача которого увеличить продолжительность импульсов до сотен мс.

Сигнал с выхода одновибратора поступает в блок регистрации. Блок регистрации состоит из интегратора (на диоде D18, конденсаторе C13 и резисторах R45 и R53) и компаратора HS24. Задача интегратора состоит в подсчете количества импульсов на входе. Как только число импульсов достигнет определенного уровня, который задается источником напряжения V7, интегратор формирует сигнал на отключение АЗК. Результаты моделирования работы схемы представлены на рисунке 4.27.

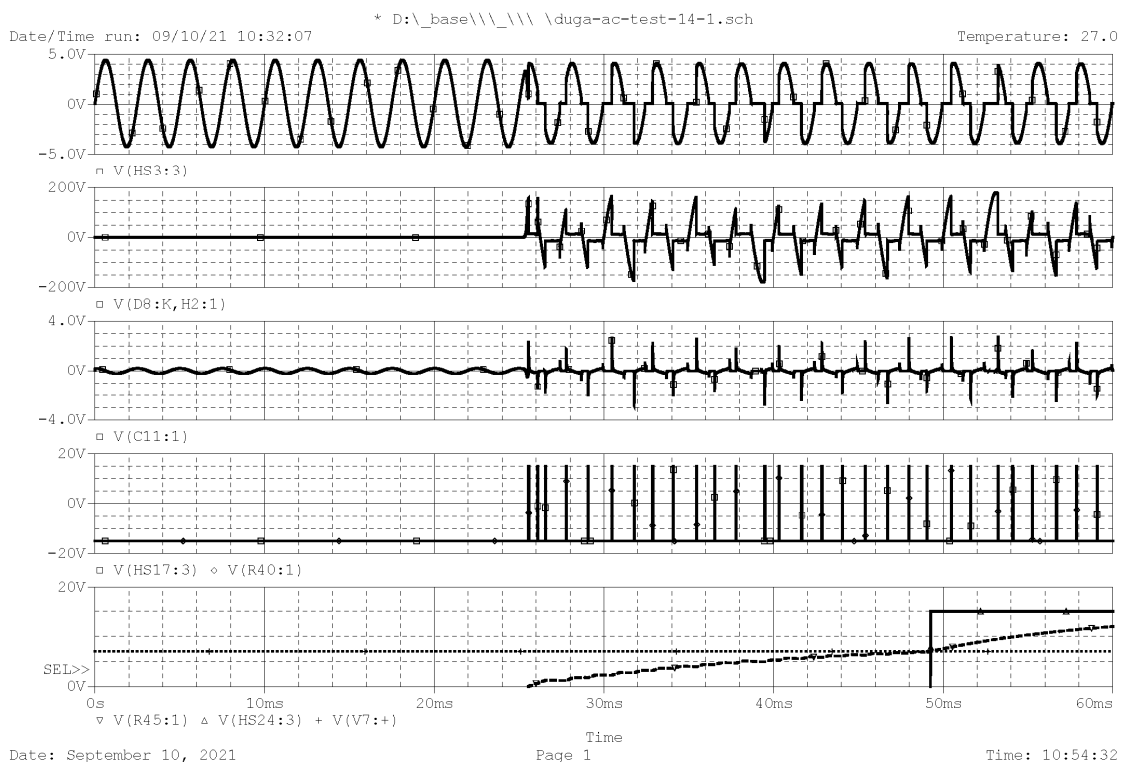


Рисунок 4.27 Результаты моделирования работы блока распознавания дуги

На графиках видно, что по истечении 25 мс. от начала моделирования происходит разрыв цепи ключом U9 и начинается имитация горения дуги. Графики 1 и 2 показывают ток и напряжение в цепи на участке, где имитируется дуга при нормальной работе и при возникновении дугового разряда. График 3 показывает сигнал производной тока на выходе RC-цепи. На графике 4 представлен сигнал, прошедший через пороговый фильтр на базе компараторов HS12 и HS17. На графике 5 изображен сигнал с интегратора (штриховая линия), пороговый сигнал (точечная линия) и выходной сигнал с блока регистрации дуги, который подается в схему управления при наличии дугового разряда. Отметим, что в течение 25 мс, пока идет горение дуги, сигнал на отключение АЗК в блоке регистратора не формируется, а происходит подсчет количества импульсов. Только по достижении порогового значения в 7 В (49 мс) происходит подача сигнала на отключение АЗК. Таким образом, конструкция блока регистрации дуги позволяет избежать ложных срабатываний.

Среди достоинств данного метода обнаружения дуги следует отметить помимо простоты реализации, сниженную помехочувствительность, так как блок распознавания игнорирует небольшие изменения тока и реагирует только на изменения тока с высоким dI/dt .

4.2.8 Распознавание дуги по действующему значению тока

В основу метода распознавания дуги по действующему значению тока положен следующий способ. В штатной цепи без дугового разряда производная синусоидального тока имеет максимальное значение при прохождении через ноль, таким образом, если взять 2 пороговых значения около нуля (одно выше, другое ниже), то разница при прохождении этих пороговых значений будет минимальной по времени. При наличии дугового разряда в цепи при прохождении тока через ноль его величина остается равной нулю, поскольку в цепи есть разрыв. С течением времени, когда напряжение на разрыве превышает напряжение зажигания дуги,

возникает дуговой разряд, и в цепи появляется ток. При этом разница по времени при прохождении двух пороговых значений будет существенно больше, чем при штатной работе цепи без дуги. На рисунке 4.28 представлена имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги.

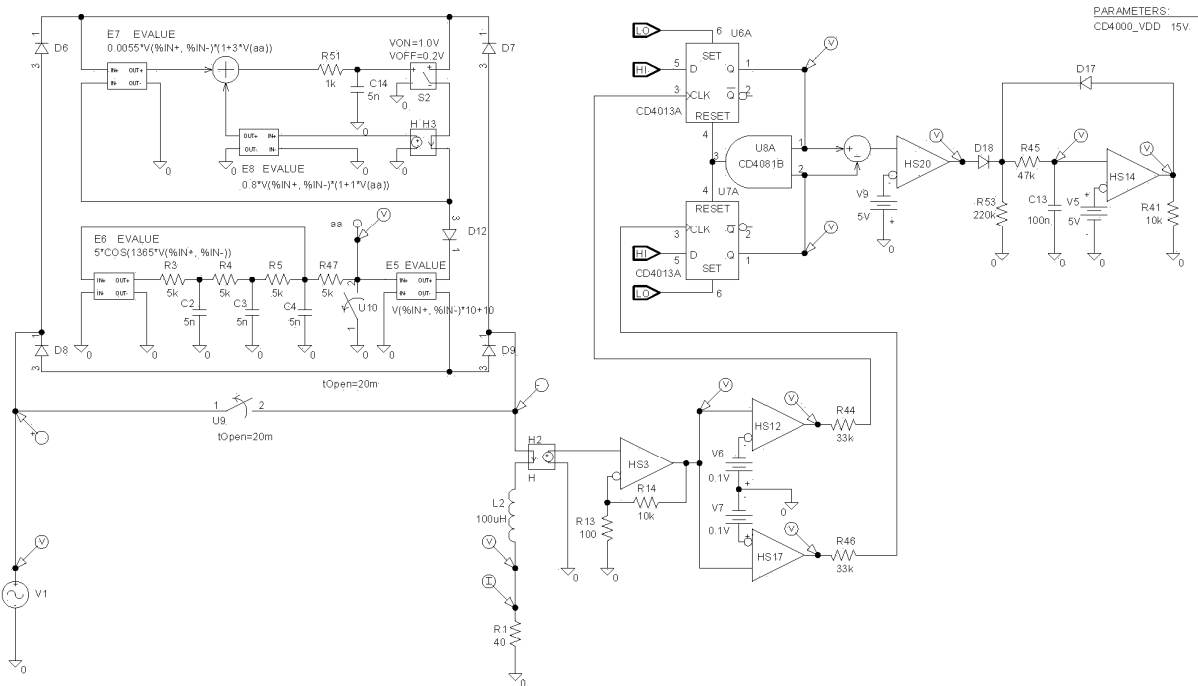


Рисунок 4.28 Имитационная компьютерная модель блока распознавания дуги по среднему значению тока

В схеме датчик тока имитирован источником напряжения, регулируемый ток, (элемент Н2). К выходу с датчика тока подключен не инвертирующий усилитель. Выходной сигнал с усилителя раздваивается и поступает на вход компараторов HS12 и HS17. Компаратор HS12 настроен на пороговое значение – 0,05 В, а HS17 – на значение +0,05 В. Величина порогового напряжения регулируется источниками V6 и V7. На выходе с компараторов стоят одновибраторы U6 и U7, каждый из которых работает для своей полуволны (положительной либо отрицательной). Пока в цепи отсутствует дуга сигналы с одновибраторов U6 и U7 приходят одновременно, таким образом, на вход интегратора на базе диода D18, конденсатора C13 и резисторов R45 и R53 приходит

сигнал с коэффициентом заполнения $K_3=0$. Как только возникает дуга, сигналы с одновибраторов U_6 и U_7 приходят в разное время, на входе интегратора появляется сигнал с $K_3>0$, происходит его интегрирование. Как только результат интегрирования достигнет определенного уровня, который задается источником напряжения V_5 , интегратор формирует сигнал на отключение АЗК. Результаты моделирования работы схемы представлены на рисунке 4.29.

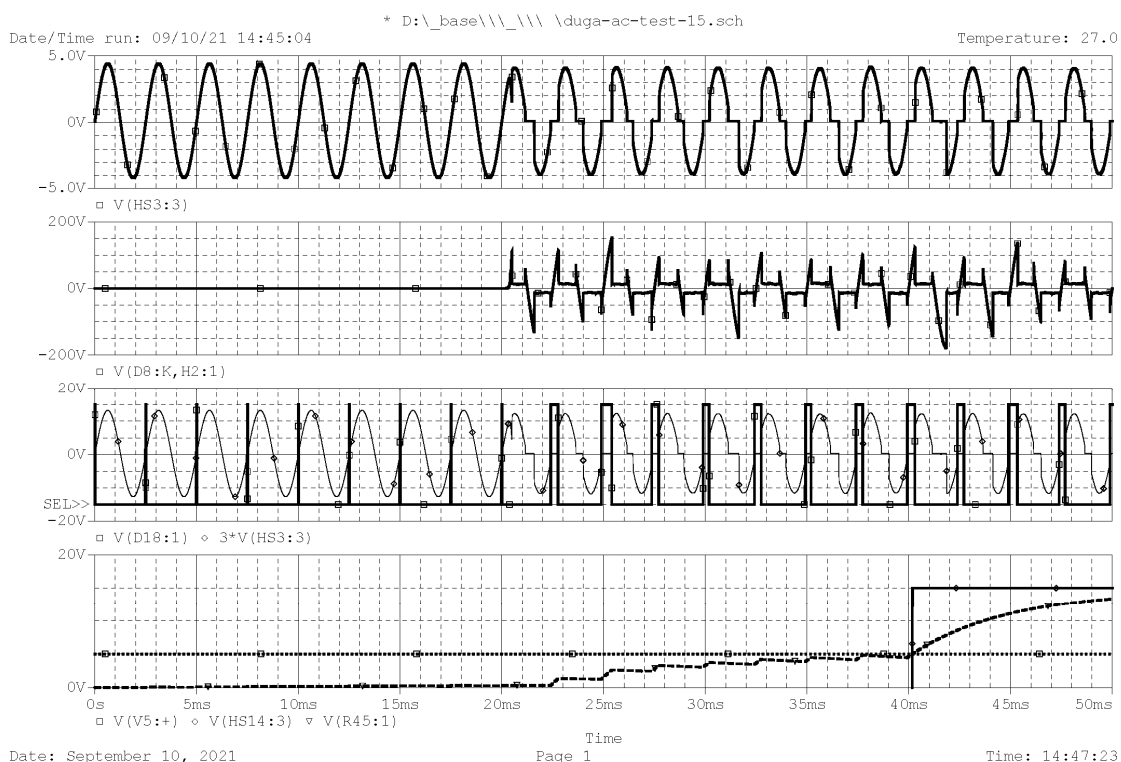


Рисунок 4.29 Результаты моделирования работы блока распознавания дуги

На графиках видно, что по истечении 20 мс. от начала моделирования происходит разрыв цепи ключом U_9 и начинается имитация горения дуги. Графики 1 и 2 показывают ток и напряжение в цепи на участке, где имитируется дуга при нормальной работе и при возникновении дугового разряда. График 3 показывает выходной сигнал с фазочастотного детектора, коэффициент заполнения которого зависит от длительности нахождения тока в околонулевой зоне. На

графике 4 изображен сигнал с интегратора (штриховая линия), пороговый сигнал (точечная линия) и выходной сигнал с блока регистрации дуги, который подается в схему управления при наличии дугового разряда. Отметим, что в течении 20 мс, пока идет горение дуги, сигнал на отключение АЗК в блоке регистратора не формируется, а происходит подсчет количества импульсов. Только по достижении порогового значения в 5 В (40 мс) происходит подача сигнала на отключение АЗК. Таким образом конструкция блока регистрации дуги позволяет избежать ложных срабатываний.

Среди достоинств данного метода обнаружения дуги следует отметить его простоту схемотехнической реализации, отсутствие дифференциатора, что позволяет избежать реагирование блока распознавания на локальные небольшие изменения тока и повышает помехочувствительность.

4.3 Структура блока распознавания и индикации дугового разряда

Для реализации блока обнаружения и ликвидации аварийного дугового разряда выбран метод обнаружения дуги по хаотическому сигналу с помощью амплитудно-частотного детектора, так как он прост в реализации при макетировании блока, обладает средним уровнем помехочувствительности и не требователен к быстродействию компонентов. Достоинства и недостатки остальных методов представлены в таблице 6.

Таблица 6 Методы обнаружения дуги, их достоинства и недостатки

№ п.п	Критерий обнаружения	Достоинства	Недостатки
1	По наличию хаоса с помощью фазо-частотного детектора;	Не реагирует на переходные процессы	Средняя помехочувствительность, сложная реализация ФЧД
2	По наличию хаоса с помощью амплитудного детектора;	Низкая помехочувствительность	Сложная реализация (треб. быстродействующий сумматор, реализация математического блока)
3	По наличию хаоса с помощью ШИМ-детектора;	Простая реализация	высокая помехочувствительность, треб. быстродействующие компоненты,
4	По наличию хаоса с помощью амплитудно-частотного детектора	Простота реализации	Средняя помехочувствительность
5	По уровню производной тока	Простота реализации, минимальное число компонентов	высокая помехочувствительность, реагирует на переходные процессы
6	По частоте производной тока	Простота реализации	Треб. быстродействующие компоненты, тонкая настройка ФЧД, реагирует на переходные процессы
7	По наличию скачков тока	Простота реализации, средняя помехочувствительность	Высокий порог чувствительности
8	По действующему значению тока	Низкая помехочувствительность, не реагирует на локальные изменения	Треб. Быстродействующий сумматор, тонкая настройка для каждого номинала тока

Имитационная компьютерная модель блока обнаружения дуги по наличию хаотического шума с помощью амплитудно-частотного детектора, входящий в состав транзисторного АЗК, представлена на рисунке 4.30.

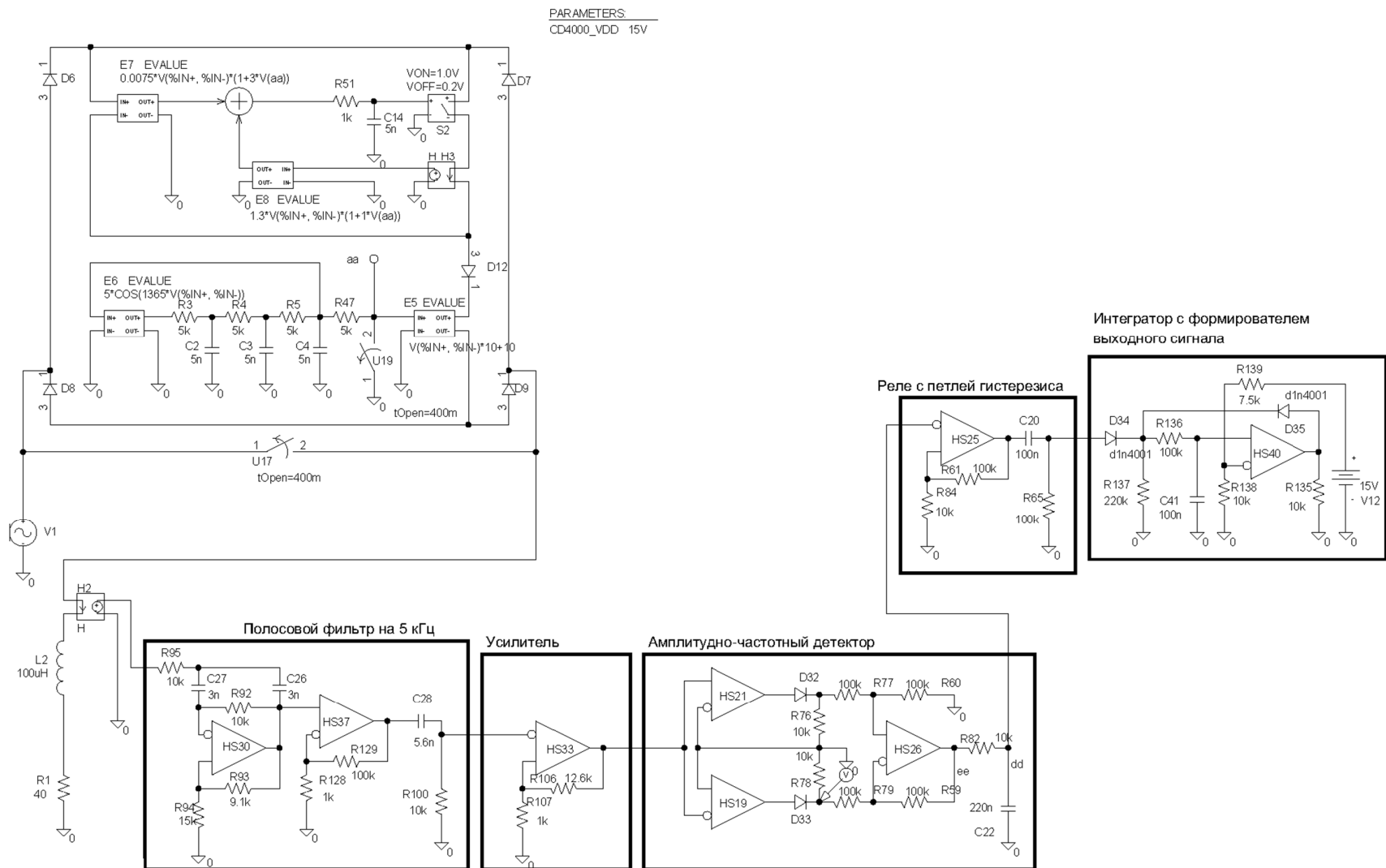


Рисунок 4.30 Имитационная компьютерная модель блока обнаружения дуги, входящего в состав транзисторного АЗК

В состав блока обнаружения дуги помимо амплитудно-частотного детектора и интегратора, совмещенного со схемой формирователя выходного сигнала, входят также полосовой фильтр и усилитель сигнала, которые позволяют обеспечить фильтрацию несущей частоты авиационной сети переменного тока, что снижает помехочувствительность датчика и уменьшает количество ложных срабатываний, связанных с ненормальной [63, стр. 17] работой системы электроснабжения.

В качестве полосового фильтра используется схема П-образного резистивно-емкостного фильтра, частота среза которого рассчитана следующим образом:

$$f_{\text{срез}} = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = 5,3 \text{ кГц} \quad , \text{ где}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{R92 \cdot C26 \cdot C27} \left(\frac{1}{R95} \right)}$$

Частота среза равная 5300 Гц подобрана экспериментально из учета обеспечения гарантированной фильтрации несущей частоты авиационной сети переменного тока и пропуска хаотического шума с частотами, имеющими наибольшие весовые коэффициенты. Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра представлена на рисунке 4.31.

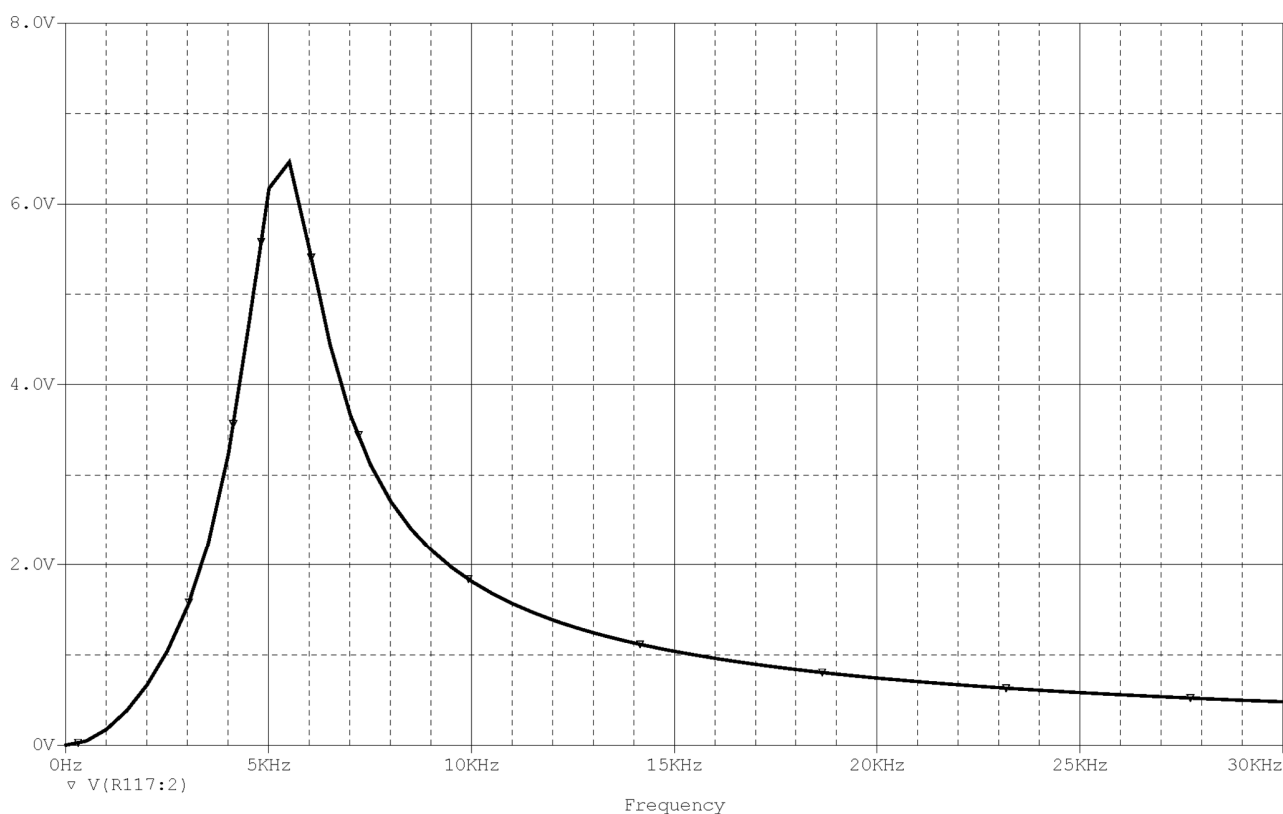


Рисунок 4.31 Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра.

4.4 Вывод

1. Установлено, что проектирование устройств обнаружения дуги с использованием реального дугового разряда является достаточно трудоёмким процессом, требующим сложной настройки и проведения большого количества повторных опытов, что вызвало необходимость в проведении дополнительных исследований в области реализации вспомогательных блоков и схем, позволяющих сократить трудоемкость и снизить сложность процесса проектирования.

2. Разработаны принципы построения, функциональные схемы, имитационные компьютерные модели следующих генераторов хаоса, построенных с использованием аналоговых и математических элементов:

- на базе D-триггера,
- на основе двух мультивибраторов с перекрестной связью,

- на основе нескольких генераторов, управляемых напряжением, с соединением их перекрестной обратной связью либо последовательным соединением их в кольцо,
- на базе Г-образного и Т-образного мостов Вина,
- на базе математического блока с рекуррентивной последовательностью.

3. Проведено исследование представленных генераторов, по результатам которого выявлены оптимальные схемы генератора хаоса с точки зрения их практической реализации, и с точки зрения затрат вычислительных ресурсов на расчет их имитационной компьютерной модели.

4. Установлено, что для реализации схем, имитирующих хаотические изменения параметров плазменной фазы горения последовательной дуги, допускается применение как генераторов чистого хаоса, так и генераторов псевдохаоса с периодом в несколько сотен миллисекунд, поскольку время распознавания и ликвидации дугового разряда не должно превышать 100 мс.

5. Разработана функциональная схема и имитационная компьютерная модель устройств синтеза временных диаграмм тока и напряжения последовательно дугового разряда, имитирующая основные признаки: наличие хронических шумов, скачков тока, пиков напряжения и характерной формы напряжения. Показана сходимость результатов моделирования временных диаграмм тока и напряжения с осциллограммами реального процесса горения последовательного дугового разряда.

6. Разработаны принципы построения, функциональные схемы, имитационные компьютерные модели для следующих методов обнаружения дуги по наличию хаоса:

- обнаружение по наличию хаоса с помощью фазочастотного детектора;
- обнаружение по наличию хаоса с помощью амплитудного детектора;
- обнаружение по наличию хаоса с помощью ШИМ-детектора;

— обнаружение по наличию хаоса с помощью амплитудно-частотного детектора

7. Разработаны принципы построения, функциональные схемы, имитационные компьютерные модели дополнительных методов обнаружения дуги по характерным свойства:

- по уровню производной тока;
- по частоте производной тока;
- по наличию скачков тока;
- по действующему значению тока.

8. Проведено сравнение указанных методов обнаружения последовательной дуги с точки зрения их практической реализации, степени помехочувствительности и требовательности к быстродействию компонентов, на основе которого для дальнейшей реализации метода в составе блока распознавания и регистрации дуги был выбран метод индикации дугового разряда по наличию хаотического широкополосного шума на основе анализа производной тока с применением амплитудно-частотного детектора.

9. Проведено имитационное компьютерное моделирование работы блока обнаружения и регистрации последовательной дуги по наличию хаоса с помощью амплитудно-частотного детектора в составе транзисторного автомата защиты и коммутации. Доказана работоспособность метода обнаружения дуги и возможность ликвидации последовательного дугового разряда транзисторным АЗК, оборудованным данным блоком.

Глава 5 Универсальный автомат защиты и коммутации переменного тока с функцией защиты от аварийных дуговых разрядов

5.1 Конструктивное исполнение прототипа транзисторного АЗК

Прототип транзисторного автомата защиты и коммутации должен удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать возможность экспериментальной проверки нескольких вариантов датчиков обнаружения дуги без кардинальной перестройки прототипа;
- обеспечивать возможность оперативной замены силового транзисторного ключа, с целью повышения ремонтпригодности;
- в составе прототипы должны применяться преимущественно компоненты отечественной элементной базы;
- компоновка прототипа должна обеспечивать удобный подход к любому участку цепи с целью измерения электрических параметров;
- массогабаритным параметры не регламентируются.

С целью удовлетворения требованиям №1 и 2 конструкция прототипа транзисторного АЗК была выполнена по модульному типу, что позволяет экспериментировать с различными вариантами не только схем обнаружения и ликвидации дуги, но и с различными вариантами силового транзисторного ключа. Структурная схема прототипа транзисторного АЗК представлена на рисунке 5.1.

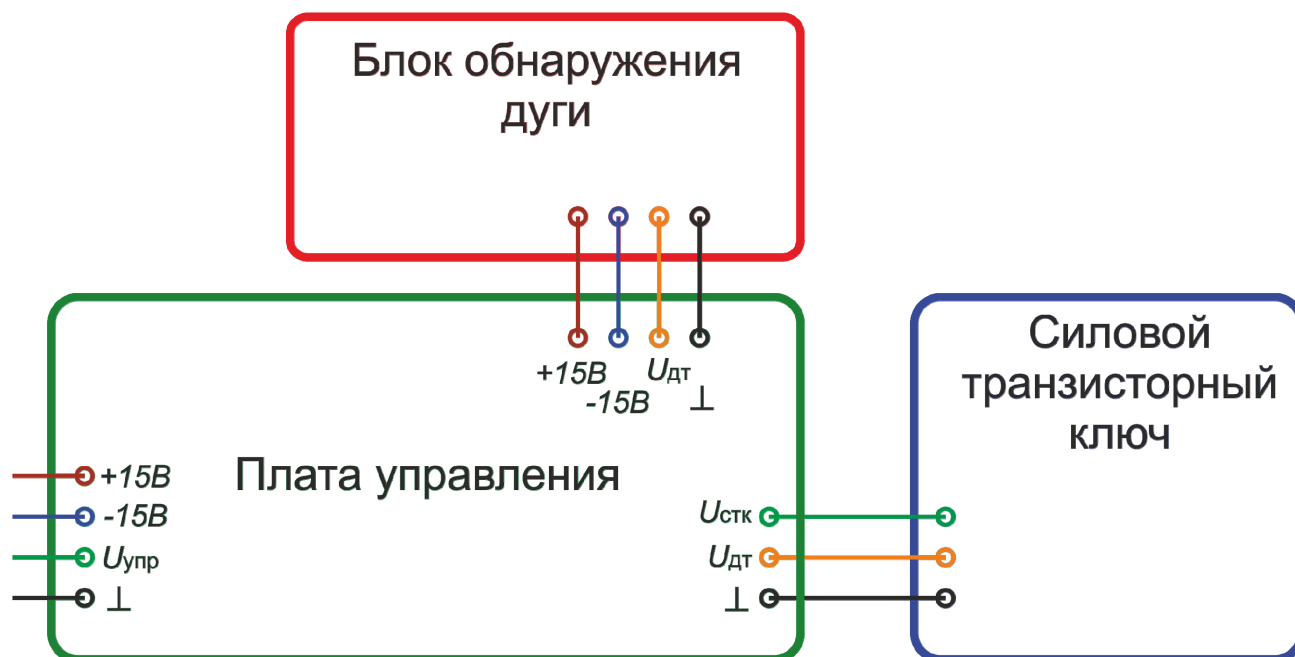


Рисунок 5.1 Структурная схема транзисторного автомата защиты и коммутации

Базовым элементом транзисторного автомата защиты и коммутации является схема управления и защиты, которая связывает все элементы АЗК в единую систему и выполняет следующие функции:

- прием сигнала управления и формирования управляющего сигнала на СТК;
- амплитудное ограничение аварийных токов;
- формирование времятоковой характеристики;
- аварийное отключение СТК при превышении предельных параметров по току;
- блокирование повторного включения АЗК при аварийном срабатывании без снятия управляющего сигнала.

Силовой транзисторный ключ для бесконтактного автомата защиты сети переменного тока может быть выполнен в нескольких вариантах, основные из которых представлены на рисунке 5.2 [19, стр. 117]. Для реализации выбрана структура СТК, обозначенная номером «1», поскольку она обладает меньшим

количеством силовых ключей более простая в управлении, присутствует защита ключа от перенапряжения, но при этом имеет повышенное падение напряжения.

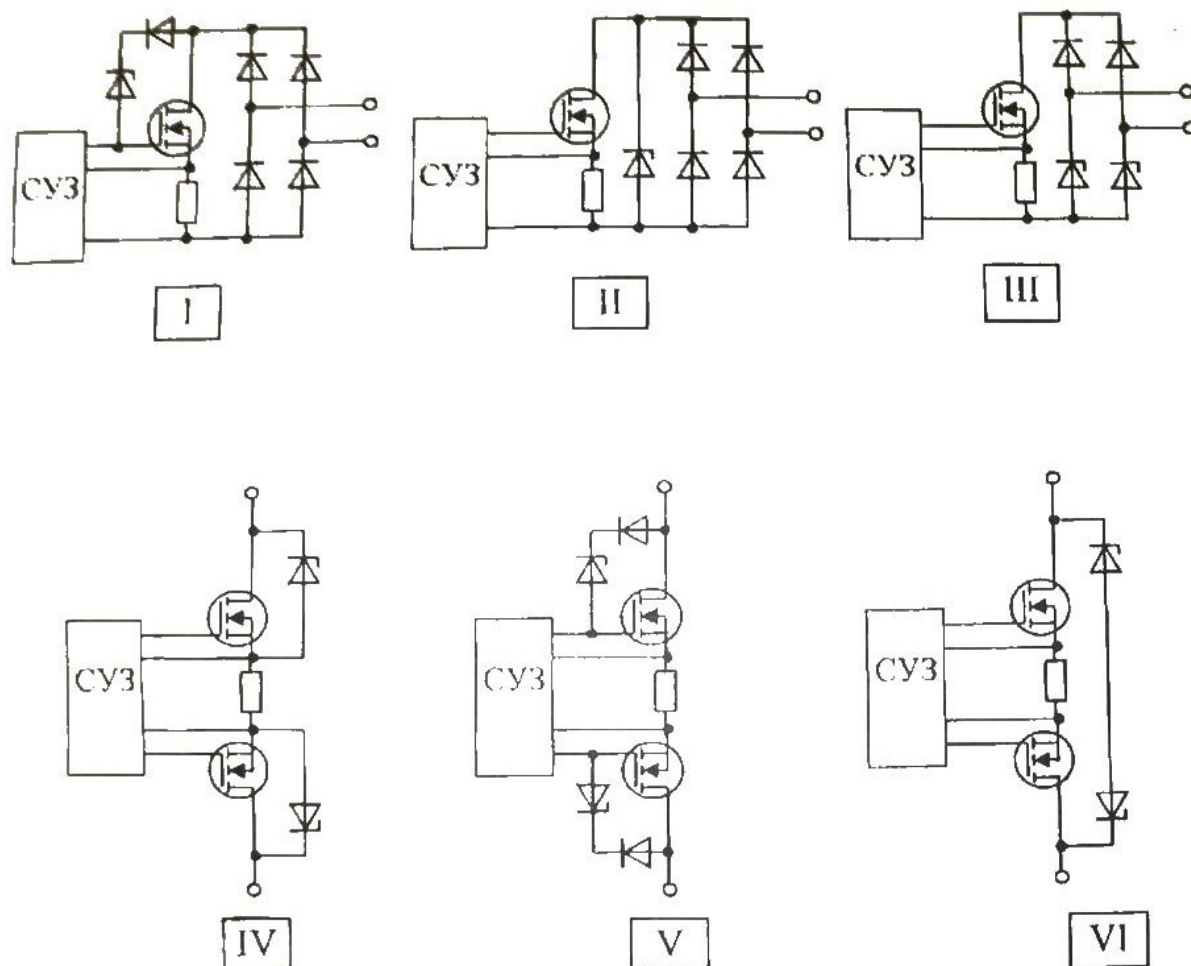


Рисунок 5.2 Основные варианты исполнения СТК для транзисторного АЗК переменного тока

Создание прототипа блока обнаружения дуги связано с высоким риском возникновения ошибки при монтаже, так как схема имеет 4 операционных усилителя и большое количество резисторов и конденсаторов. С целью минимизации количества ошибок при создании прототипа была разработана принципиальная электрическая схема блока обнаружения дуги (рисунок 5.3), на основе которой была выполнена трассировка печатной платы, представлена на рисунке 5.4.

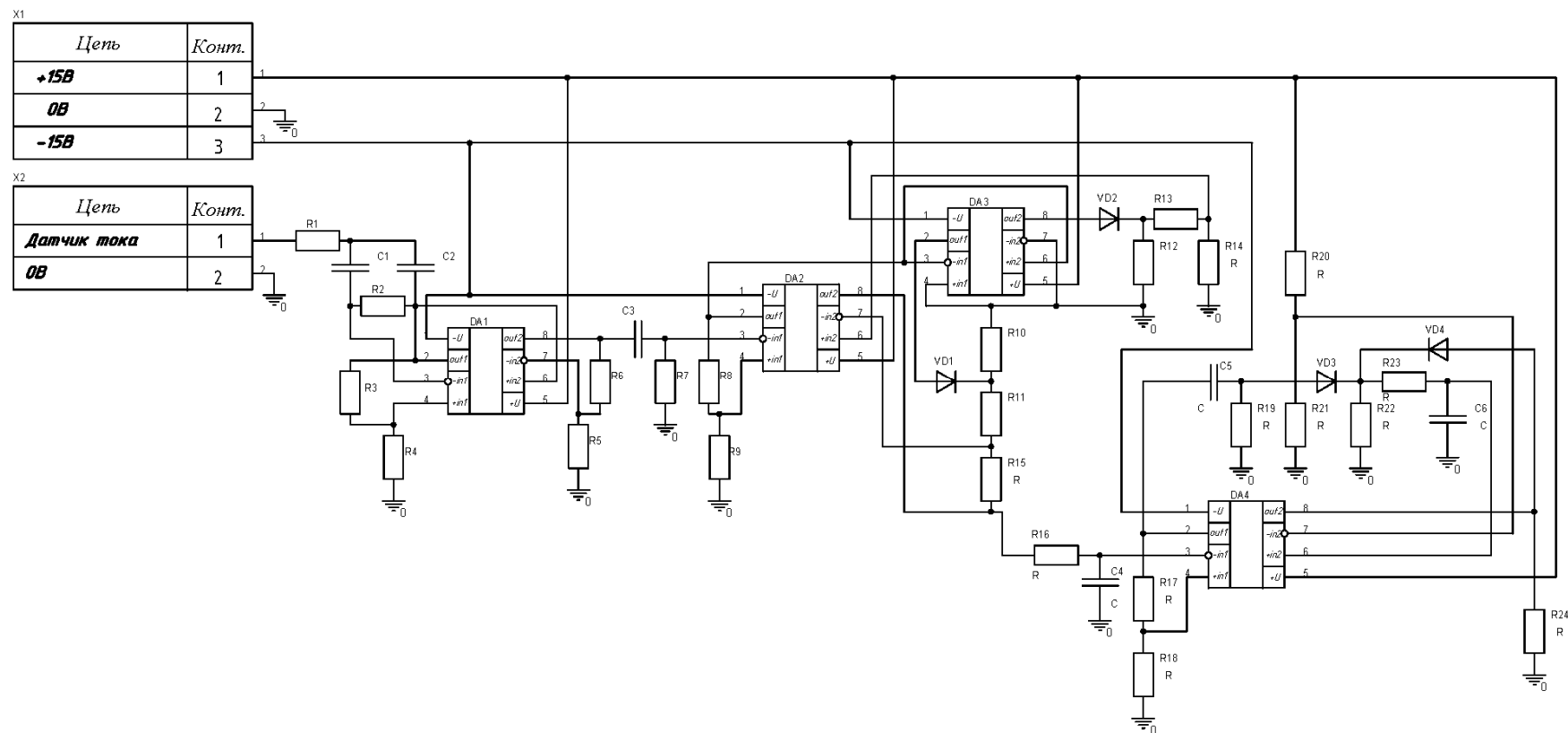


Рисунок 5.3 Схема электрическая принципиальная блока обнаружения дуги

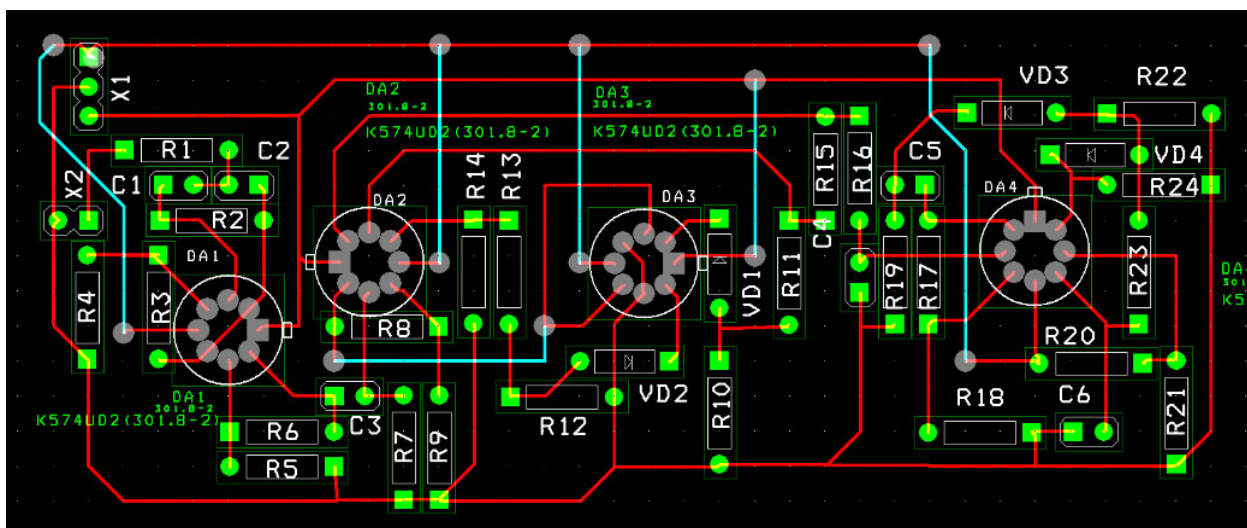


Рисунок 5.4 Трассировка печатной платы блока обнаружения дуги

С целью выполнения всех требований, указанных выше, прототип транзисторного АЗК был изготовлен по технологии изготовления печатных плат с односторонним выводным монтажом с использованием элементной базы выводного монтажа (рисунок 5.5).

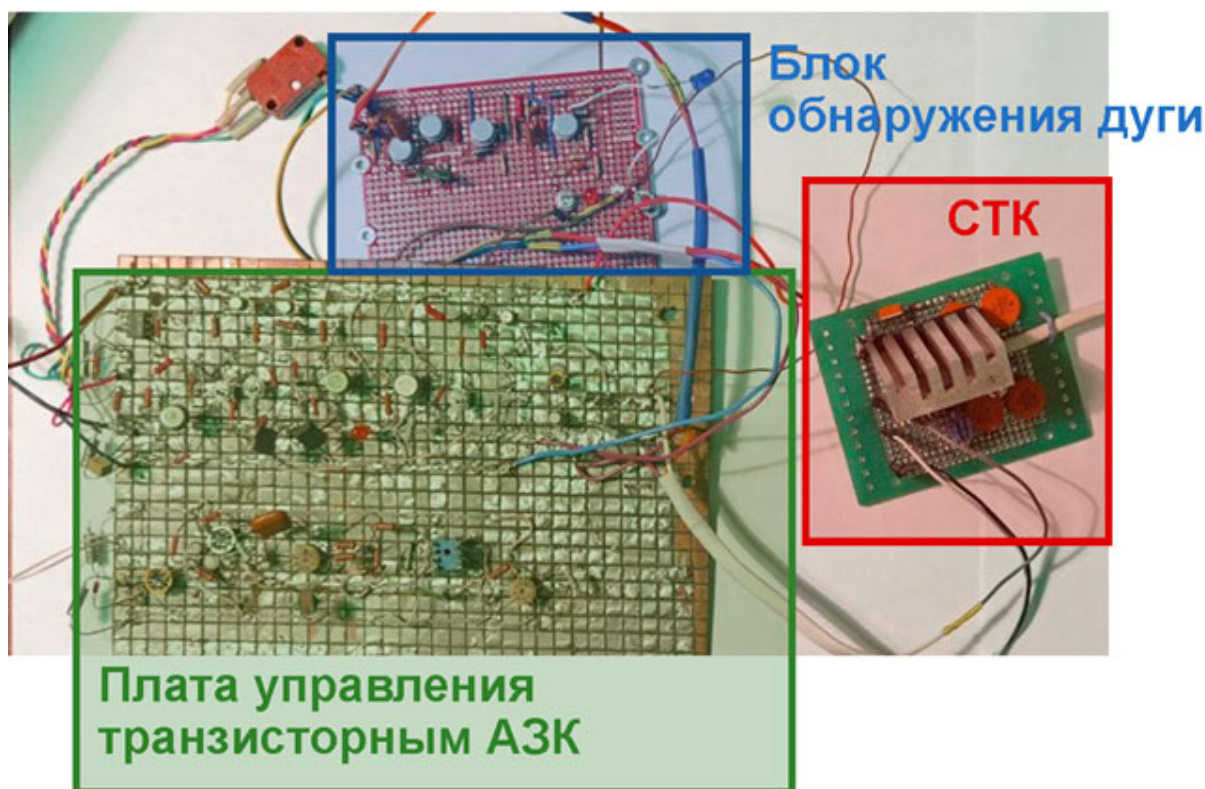


Рисунок 5.5 Фотография прототипа транзисторного АЗК

Для реализации прототипа транзисторного АЗК потребовалось:

- 7 операционных усилителей типа К574УД2Б;
- 6 транзисторов NPN-структуры типа КТ312В;
- 6 транзисторов PNP-структуры типа КТ326А или КТ313Б;
- керамические конденсаторы номиналом от 3нФ до 1мкФ;
- керамические резисторы типа С2-33Н-0,125Вт;
- оптопара типа АОТ128Б.

Для реализации транзисторных аппаратов защиты и коммутации в серийном облике с приемлемыми габаритами предполагается применение интегрально-гибридной технологии с бескорпусными компонентами, либо компонентами в малогабаритных корпусах поверхностного монтажа, при этом желательно использование аналоговых, либо аналого-цифровых базовых матричных кристаллов (БМК).

На рынке радиоэлектронных изделий на 2022 г. имеются отечественные аналого-цифровые БМК для проектирования радиационно-стойких СБИС серии 5400 производства «Дизайн Центр «Союз» типа 5400КТ1Т и 5400БКУ2У, построенных по технологии КМОП КНИ (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник кремний на изоляторе) по техпроцессу 0,24 мкм, с габаритными размерами, не превышающими 22х22 мм. Диапазон температур для таких элементов лежит от -60°С до +125°С, что полностью удовлетворяет требованиям к авиационному электрооборудованию.

В составе БМК имеются резисторы с максимальным сопротивлением до 22 МОм, неполярные конденсаторы емкостью до 450 пФ, несколько десятков быстродействующих операционных усилителя, несколько десятков дополнительных ОУ общего применения, несколько десятков и логических вентилях. В ряде случаев в состав БМК могут быть включены цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) и регистры для аналого-цифрового преобразователя.

Таким образом, реализация транзисторного аппарата защиты и коммутации на аналого-цифровых БМК отечественного производства возможна, но при дополнении электролитическими конденсаторами и керамическими конденсаторами большой емкости. Рассчитано, что площадь, занимаемая электролитическим конденсаторами и керамическими конденсаторами большого номинала, которые невозможно выполнить в составе БМК, будет сопоставима с современными цифровыми устройствами, при этом данные устройства менее подвержены воздействию электромагнитных помех, что позволяет отказаться от значительных конструктивных мер по экранированию печатных плат.

5.2 Результаты экспериментального исследования

Исследование работоспособности прототипа транзисторного автомата защиты и коммутации проводилось с подключением к авиационной сети переменного тока с напряжением 115/200В и частотой 400Гц. В ходе исследований проверялась возможность коммутации резистивно-индуктивной нагрузки при токах близких к нулю, а также способность прототипа обнаруживать и ликвидировать последовательный аварийный дуговой разряд. Осциллограммы тока и напряжения возникновения последовательной дуги и ее ликвидации транзисторным АЗК представлена на рисунке 5.6.

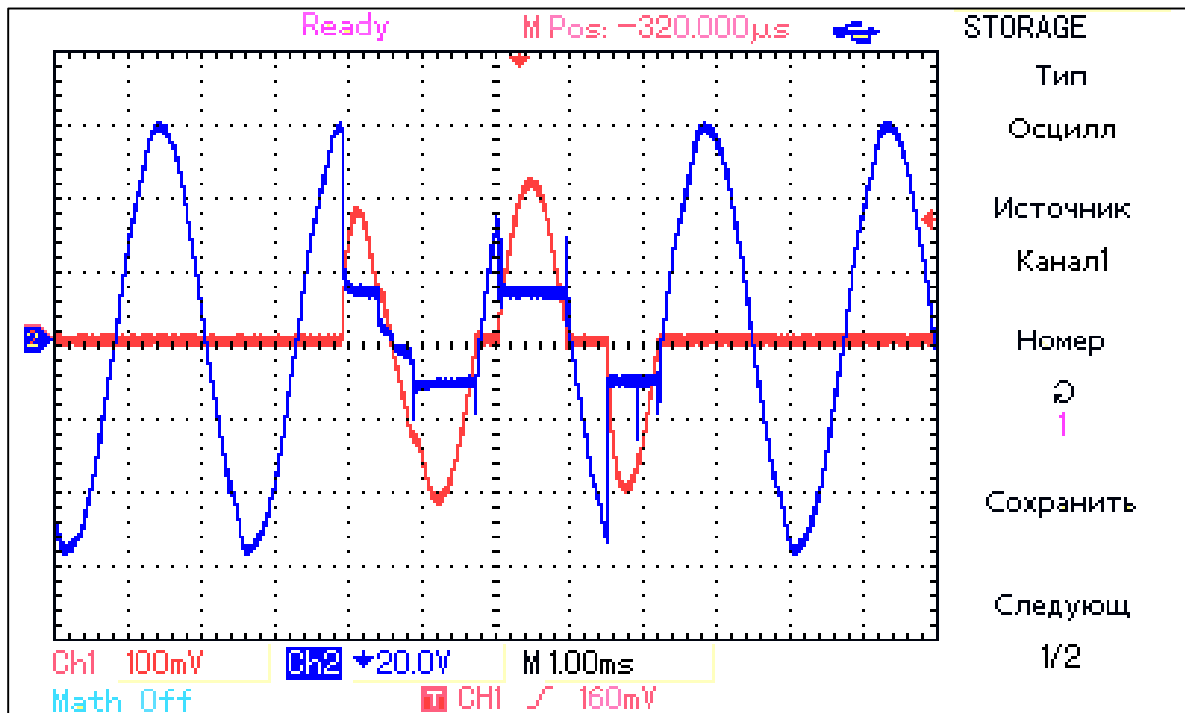


Рисунок 5.6 Осциллограммы тока и напряжения возникновения последовательной дуги и ее ликвидации транзисторным АЗК

На рисунке 5.6 отчетливо наблюдается возникновение во втором периоде последовательного дугового разряда (присутствует характерная форма напряжения), который горит в течении 2 периодов. По истечении второго периода (для частоты 400 Гц продолжительность составляет 5 мс) происходит разрыв цепи, вызванный отключением транзисторного АЗК. Время реакции транзисторного АЗК для данного опыта выбрано минимально возможным, с целью отображения на одной осциллограмме момента возникновения и ликвидации аварийной дуги. Увеличение времени реакции транзисторного АЗК производится путем увеличения порогового напряжения на отрицательном выводе последнего операционного усилителя и на алгоритмы обнаружения дуги не влияет.

5.3 Вывод

1. Представлен прототип транзисторного автомата защиты и коммутации для авиационной сети переменного тока с функцией обнаружения и ликвидации аварийных дуговых разрядов, выполненный по модульной конструкции, позволяющей:

- обеспечивать возможность экспериментальной проверки нескольких вариантов датчиков обнаружения дуги без кардинальной перестройки прототипа;
- обеспечивать возможность оперативной замены силового транзисторного ключа, с целью повышения ремонтпригодности;
- обеспечивать удобный подход к любому участку цепи с целью измерения электрических параметров.

2. Предложена технология производства транзисторных автоматов защиты и коммутации в серийном облике с использованием базовых матричных кристаллов, позволяющая реализовать серийные транзисторные АЗК с массогабаритными параметрами, не уступающими цифровой вычислительной техники при этом обеспечивающая приемлемый уровень помехозащищенности.

3. Проведено экспериментальное исследование, по результатам которого подтверждена работоспособность прототипа транзисторного АЗК. Аварийный дуговой разряд последовательного типа в авиационной сети переменного тока был обнаружен и ликвидирован в течении 5 мс. Стоит отметить, что время ликвидации было выбрано минимально возможным, с целью демонстрации на одной осциллограмме момента возникновения и ликвидации дуги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы и разработаны электронные устройства нового типа, предназначенные для обнаружения и ликвидации аварийных дуговых разрядов в авиационных электросетях переменного тока, реализованные как дополнение к транзисторным аппаратам коммутации и защиты от токовых перегрузок.

2. Представлена оценка применимости в авиационных условиях известных методов обнаружения и ликвидации аварийных дуговых разрядов в электросетях переменного тока.

3. Предложен метод ликвидации аварийного дугового разряда параллельного типа, основанный на способности транзисторных аппаратов защиты к амплитудному ограничению тока.

4. Разработаны и изготовлены портативные стенды для экспериментальных исследований характерных свойств дугового разряда последовательного типа в цепях переменного тока в установившихся и прерывистых режимах горения.

5. В ходе экспериментов пополнены сведения о свойствах аварийных дуговых разрядов последовательного типа в сетях переменного тока. Установлено наличие двух фаз горения дугового разряда, определена их энергетическая равноценность и зависимость энергии фаз от типа нагрузки фидера и от материалов электродов.

6. Показано, что наиболее рациональным методом обнаружения последовательного дугового разряда является индикация по факту наличия хаотических процессов в пульсациях тока, вызванных как свойствами плазменной фазы, так и наличием хаотических механических вибраций дугового промежутка.

7. Разработаны принципы построения, функциональные схемы, компьютерные модели и лабораторные макеты индикаторов последовательной дуги по факту хаотических изменений её параметров.

8. Разработаны принципы построения, функциональные схемы, компьютерные модели и лабораторные макеты вспомогательных блоков, предназначенных для сокращения трудоёмких манипуляций с реальной дугой.

9. Разработана функциональная схема, компьютерная модель и лабораторный макет транзисторного аппарата коммутации и защиты переменного тока с функциями индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов параллельного и последовательного типов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

NFPA – National Fire Protection Association (Национальная ассоциация противопожарной защиты)

АЗК – Автомат защиты и коммутации

АЗКБ – Автомат защиты и коммутации (бесконтактный)

АЦП – Аналого-цифровой преобразователь

БМК – Базовый матричный кристалл

БОН – Блок ограничения напряжения

БОО – Блок организации отключения

БОТ – Блок ограничения тока

БУЗ – Блок управления и защиты

ВИП – Вторичный источник питания

ГИС – Гибридная интегральная микросхема

ГУН – Генератор, управляемый напряжением

ДТ – Датчик тока

КМОП – Комплементарная структура металл-оксид-полупроводник

КНИ – Кремний на изоляторе (технология)

ЛА – Летательный аппарат

МОП – Металл-оксид-полупроводник (тип транзистора)

ОУ – Операционный усилитель

ППФ – Полосо-пропускающий фильтр

СТК – Силовой транзисторный ключ

СЭС – Система электроснабжения

ФЧД – Фазочастотный детектор

ЦАП – Цифро-аналоговый преобразователь

ШИМ – Широтно-импульсная модуляция

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. 10031173 United States, CPC H02H 3/347, H02H 1/0015, H02H 3/162, H02H 3/331, G01R 31/025, G01R 31/1227. Arc fault and ground fault interrupter using dual adc / Lentz B.T., Beierschmitt J.R., Gass R.J., Drame I.V.; applicant Schneider Electric USA Inc. – №14/709164; filed 11.05.2015; publ. 24.06.2018. – 13 p.

2. А.с. 2018145497 United States, CPC H02H 1/0092, H02H 3/16, G01R 31/025, H02H 3/05, H02H 1/0015. Method to utilize multiple configuration software for DF/CAFI breakers / Jacupi A.; applicant Schneider Electric USA Inc. – №15/360007; filed 23.11.2016; publ. 24.05.2018. – 9 p.

3. А.с. 20190052072 United States, CPC H02H 1/0015, H02H 3/331, G01R 31/2801, G01R 31/025, H02H 3/334. Integrated arc fault and ground fault current sensing package / Gass R.J., Potratz J., Fleeg D.W., applicant Schneider Electric USA Inc. – №25/672744; filed 09.08.2017; publ. 14.02.2019. – 10 p.

4. А.с. 2019199080 United States, CPC H02H 1/0015, H02H 3/26, H02H 3/105. Arc fault detection system / Schmalz S.C., Davis R.K., Okerman J.K.A., Jimenez S.O., applicant Eaton Corporation. – №15/850224; filed 21.12.2017; publ. 27.06.2019. – 13 p.

5. Пат. 2019026050 World Intellectual Property Organization, CPC H02H 1/00, H02H 7/26, H02H 7/22. Apparatus and method for arc flash protection in electrical power systems / Hrcir D.E., Burns R.J., applicant Eaton Intelligent Power Limit ED. – №15/668382; filed 03.08.2017; publ. 07.02.2019. – 37 p.

6. Пат. 2591847 Российская Федерация, МПК H02H 7/26, H02H 3/08. Адаптивное детектирование света для систем ослабления дуги / Бэрри Р., Генри П.; заявитель и патентообладатель Шнейдер Электрик Юэсэй инк. – №2014102746/07; заявл. 27.09.2017; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20. – 20 с.

7. Пат. 2642467 Российская Федерация, МПК H02H 3/00. Буфер для принятия решения об отключении при адаптивном обнаружении дугового короткого замыкания / Шредер Дж. Д.; заявитель и патентообладатель Шнейдер Электрик

Юэсэй инк. – №2015152791; заявл. 27.06.2013; опубл. 28.07.2017, Бюл. № 22. – 18 с.

8. Пат. 2654046 Российская Федерация, МПК H01H 9/54, H02H 3/26. Распределенная защита от дугового пробоя между выводным устройством и прерывателем цепи / Шредер Дж. Д., Бейершмитт Дж.; заявитель и патентообладатель Шнейдер Электрик Юэсэй инк. – №2016105243; заявл. 30.09.2013; опубл. 13.11.2017, Бюл. № 32. – 23 с.

9. Пат. 3022065 Canada, Cl.Int./Int.Cl. H02H 3/02, H02H 1/00, H02H 3/00, H02H 9/08. Interrupter de circuit a l'etat solide contre les perturbations de ligne solid-state line disturbance circuit interrupter / Telefus M., Larson B., Rodriguez H., Gerber St. C.; agent MBM Intellectual Property Law LLP. – №2017/031207; dep. 05.05.2017; publ. 16.11.2017. – 29 p.

10. Пат. 5986860 United States, CPC H02H 3/00. Zone arc fault detection / Scott G.W., applicant Square D Company. – №09/026303; filed 19.02.1998; publ. 16.11.1999. – 25 p.

11. Пат. 9190836 United States, CPC H02H 7/268, G01R 31/024, G01R 31/282, G01R 31/405, H02H 50/10. Potential arc fault detection and suppression / Dent P.W., applicant Dent P.W. – №14/512417; filed 11.10.2014; publ. 17.11.2015. – 22 p.

12. Пат. 9318283 United States, CPC H02H 3/00, H01H 33/04, H01F 30/00, F03D 11/00. Apparatus including a circuit breaker adapted to selectively provide arc flash protection in connection with a wind turbine / Becker E.B., Nelson R.J., applicant Siemens Aktiengesellschaft. – №14/284664; filed 22.05.2014; publ. 19.04.2016. – 7 p.

13. Пат. 9612267 United States, CPC H02H 3/00, G01R 31/02, G01R 19/165, G01R 31/00, H02H 1/00. Arc fault detection system and method and circuit interrupter employing same / Kolker D., Bhalwankar Ch., Pahl B., Schmalz S.C., Agarwal A., applicant Eaton Corporation. – №14/584127; filed 29.12.2014; publ. 04.04.2017. – 33 p.

14. Гуткин- Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств. – М.: Советское радио, 1975. – 375с.

15. Конев Ю.И. Системы электрооборудования ЛА : учебное пособие / Ю.И. Конев, В.М. Ермошин ; МАИ. – М.: Изд-во МАИ, 1997. – 96 с.
16. Куликовский К.В. Транзисторное устройство защиты авиационных систем распределения электроэнергии от аварийных электрических разрядов : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Куликовский Кирилл Владиславович ; науч. рук. Е.В. Машуков ; МАИ (НИУ). – Москва, 2016. – 156 с.
17. Лазарев И.А. Синтез структуры систем электроснабжения летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
18. Машуков Е.В. Транзисторные автоматы защиты и коммутации: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1984. – 40 с.
19. Машуков Е.В. Транзисторные аппараты защиты и коммутации для авиационных систем распределения электроэнергии / Е.В. Машуков, Г.М. Ульященко, Д.А. Шевцов – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. – 188 с.
20. Машуков Е.В. Устройства защиты авиационных электросетей от аварийных дуговых разрядов / Е.В. Машуков, Д.А. Шевцов, Г.М. Ульященко – М.: Изд-во МАИ, 2016. – 160 с.
21. Микроэлектронные электросистемы. Применения в радиоэлектронике / Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
22. Могилевский Г.В. Полупроводниковые аппараты защиты. / Могилевский Г.В., Райнин В.Е., Гребенник В.И. – М.: Энергия, 1980. – 168 с.
23. Синдеев И.М. Электроснабжение летательных аппаратов. Учебник для вузов гражданской авиации. – М.: Транспорт, 1982. – 272 с.
24. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. В 2 т./ Титце У. Шенк К. – Изд. 12-е – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с.
25. Хоровиц П. Искусство схемотехники / Хоровиц П., Хилл У. : пер.с англ. Б.Н. Бронина, А.И. Коротова, М.Н. Микшиса – Изд. 2-е. – М.: Изд-во БИНОМ, 2014. – 704 с.

26. Черепанов В.П. Электронные приборы для защиты РЭА от электрических перегрузок: Справочник. / Черепанов В.П., Хрулев А.К., Блудов И.П. – М.: Радио и связь, 1994. – 224с.

27. Шопен Л.В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 567 с.

28. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В 2 т. Т. 1 Системы электроснабжения летательных аппаратов / С.А. Грузков, С.Ю. Останин, А.М. Сугробов, А.Б. Токарев, П.А. Тыричев ; под редакцией С.А. Грузкова. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 568 с.

29. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В 2 т. Т. 2 Элементы и системы электрооборудования – приемники электрической энергии / С.А. Грузков, С.Ю. Останин, А.М. Сугробов, А.Б. Токарев, П.А. Тыричев ; под редакцией С.А. Грузкова. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 552 с.

30. Электроснабжение летательных аппаратов / Под ред. Н.Т. Коробана. – М.: Машиностроение, 1975. – 536 с.

31. Энгель А. Физика и техника электрического разряда в газах. В 2 т. Т.2 Свойства газовых разрядов технические применения / А. Энгель, М. Штенбек ; пер. с нем. Д. Канаскова, Э. Рейхруделя, Г. Тягунова – Л.: 2-я типография ОНТИ Е. Соколовой, 1936. – 382 с.

32. Бузыкин С.Г. Защита силовых транзисторных ключей / Бузыкин С.Г., Голиков В.Ю., Недолужко И.Г. // Труды МЭИ. – М.: Изд-во МЭИ, 1978. – № 382. – С. 9-15.

33. В.И. Смирнов. Спектральный и временной методы измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 10. – С. 58–63.

34. Конев Ю.И. Принципы миниатюризации бесконтактной коммутационной аппаратуры // Электронная техника в автоматике: Сборник статей / Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Советское радио, 1974. – № 6. – С. 3 -13.

35. Конев Ю.И. Силовые МДП транзисторы в устройствах коммутации и защиты / Конев Ю.И., Машуков Е.В. // Электронная техника в автоматике / Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1984. – № 15. – С. 19-22.

36. Куликовский К.В. Методы индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в системах электроснабжения / К.В. Куликовский, Е.В. Машуков, Г.М. Ульященко // Практическая силовая электроника. – 2014. – №3(55). – С. 23-28.

37. Куликовский К.В. Методы ликвидации параллельной дуги в авиационных системах электроснабжения постоянного тока / К.В. Куликовский, Е.В. Машуков, Г.М. Ульященко, Д.А. Шевцов // Практическая силовая электроника. – 2014. – №1(53). – С. 2-6.

38. Куликовский К.В. Проблемы ликвидации аварийных дуговых разрядов в авиационных системах электроснабжения / К.В. Куликовский, Е.В. Машуков, Г.М. Ульященко, Д.А. Шевцов // Практическая силовая электроника. – 2013. – №4(52). – С. 17-20.

39. Леонов В.П. Моделирование мощного транзистора в ключевом режиме // Изв. вузов, сер. Радиоэлектроника, том XXV, – 1982. – №1 – С. 56-61.

40. Машуков Е.В. Моделирование ключей на силовых МДП транзисторах / Машуков Е.В., Хрунов Е.М., Шевцов Д.А. // Электронная техника в автоматике: Сборник статей / Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1986. – № 17. – С. 168-182.

41. Машуков Е.В. Влияние формирователей траекторий переключения транзисторов на динамические свойства транзисторных ключей / Машуков Е.В., Сергеев В.В., Шевцов Д.А. // Радиопромышленность: Тематический выпуск. – М.: НИИЭИР, 1996. – С. 42-44.

42. Машуков Е.В. Полупроводниковые аппараты защиты и коммутации для автономных систем электропитания / Машуков Е.В., Шевцов Д.А. // Электропитание: Научно-технический сборник. – М.: Ассоциация «Электропитание». – № 1. – С. 76-84.

43. Машуков Е.В. Принципы построения транзисторных аппаратов защиты и коммутации переменного тока / Машуков Е.В., Серафимов А.Е., Шевцов Д.А. // Практическая силовая электроника – М.: ЗАО МПП «ИРБИС», 2001. – №3 – С. 35-37.

44. Машуков Е.В. Проектирование коммутационно-защитной аппаратуры авиационных распределительных сетей / Е.В. Машуков, Г.М. Ульященко, Д.А. Шевцов // Практическая силовая электроника. – 2018. – №4(72). – С. 25-30.

45. Машуков Е.В. Тепловая модель МДП транзистора с параметрами, рассчитанными по области максимальных режимов / Машуков Е.В., Шевцов Д.А., Ульященко Г.М. // Радиопромышленность. – М.: НИИЭИР, 1996. – №3 – С. 83-85.

46. Машуков Е.В. Транзисторная коммутационно-защитная аппаратура для систем распределения электроэнергии / Машуков Е.В., Шевцов Д.А. // Практическая силовая электроника. – М.: ЗАО МПП «ИРБИС», 2003. – №3 – С. 14 -18.

47. Машуков Е.В. Транзисторная коммутационно-защитная аппаратура в системах распределения электроэнергии: проблемы и достижения / Машуков Е.В., Распертое В.В., Серафимов А.Е. // Тематический сборник научных трудов, М.: ЭКОН, 1999. – С. 3-13.

48. Машуков Е.В. Транзисторные автоматы защиты с непрерывным ограничением тока // Электронная техника в автоматике: Сборник статей / Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Советское радио, 1978. – № 10. – С. 79 -86.

49. Мощные полупроводниковые контроллеры для космического корабля НАСА // Электроника, 1976. – № 16 – С. 99-100.

50. Основные проблемы миниатюризации электронных устройств и систем // Электронная техника в автоматике: Сборник статей / Под. ред. Ю.И. Конева. – М.: Советское радио, 1975. –№ 7 – С. 3-13.

51. Осокин П.Л. Бесконтактные автоматы защиты и коммутации в сетях переменного тока // Электронная техника в автоматике / Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1983. – № 14. – С. 215-222.

52. Плотников В.И. Возможные направления развития коммутационных аппаратов для автономных систем автоматике / Плотников В.И., Григорьев А.А., Самарин Е.В. // Всесоюзный проектно-конструкторский и технологический институт релестроения. – 1989. – №11. – С. 73-76.

53. Серафимов А.Е. Возможности применения транзисторных автоматов защиты и коммутации в сетях переменного тока / Серафимов А.Е., Машуков Е.В. // Радиоэлектроника и электротехника в народном хозяйстве: Тез. докладов. – М.: МЭИ, 1997. – С. 149-150.

54. Ульященко Г.М. Анализ автоматов защиты и коммутации как элементов системы электроснабжения. // Теория и практика силовых транзисторных устройств. Тематический сборник научных трудов / Под ред. Е.В. Машукова. – М.: ЭКОН, 2001. – С. 31-37.

55. Ульященко Г.М. Энергоузел автоматической системы управления распределением электроэнергии // Электромагнитные и полупроводниковые устройства систем управления ДА: Сб. научных трудов. – М.: Изд-во МАИ, 1987. – С. 28-30.

56. Уоллер Л. Бортовые полупроводниковые системы контроля и распределения электропитания. // Электроника. – 1988. – №8. – С. 5-7.

57. Шевцов Д.А. Бесконтактные аппараты защиты и коммутации на силовых МДП транзисторах. // Транзисторная энергетическая электроника: Сб. научных трудов. – М.: Изд-во МАИ, 1991. – С. 11-15.

58. Шевцов Д.А. Выбор типономиналов транзисторных АЗК для авиационных систем электропитания. // Силовые транзисторные устройства: Тематический сборник научных трудов / Под ред. Е.В. Машукова. – М.: Экон-Информ, 2004. – №1 – С. 25-32.

59. Шевцов Д.А. Метод определения параметров модели мощного МДП транзистора. // Бортовые преобразователи систем электрооборудования ДА: Сб. научных трудов. – М.: Изд-во МАИ, 1986. – С. 48-51.

60. Шевцов Д.А. Методы индикации и ликвидации аварийных дуговых разрядов в системах электроснабжения / Д.А. Шевцов, Г.М. Улященко // Практическая силовая электроника. – 2018. – №2(70). – С. 20-26.

61. Шевцов Д.А. Обеспечение безопасности силовых МДП ключей в составе транзисторных АЗК. // Силовые транзисторные устройства: Тематический сборник научных трудов / Под ред. Е.В. Машукова. – М.: Экон-Информ, 2004. – №1 – С. 43-53.

62. Шевцов Д.А. Обобщенный алгоритм оптимального параметрического синтеза АЗК. // Силовые транзисторные устройства: Тематический сборник научных трудов / Под ред. Е.В. Машукова. – М.: Экон-Информ, 2004. – №1 – С. 54-60.

63. ГОСТ Р 54073-2017. Системы электроснабжения вертолетов и самолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2018-06-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. Официальное. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 35 с.

64. ОСТ 1001195-76. Аппараты защиты бортовых электрических сетей самолетов и вертолетов. Методика выбора и правильности установки в СЭС : отраслевой стандарт : дата введения 1977-01-01.

65. ОСТ 101078-98. Аппараты защиты и коммутации бесконтактные. Общие технические требования : отраслевой стандарт : дата введения 1999-01-01.

66. ОСТ 101108-84. Автоматы защиты бортовых электрических сетей. Общие технические требования. Правила выбора, установки и эксплуатации : отраслевой стандарт : дата введения 1986-01-01.

67. КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний : квалификационные требования : дата введения 2005-10-01 – Изд. Официальное. – Москва : АР МАК, 2004. – 324 с.
68. UL 1999. Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters : Feb. 26, 1999 / Underwriters Laboratories Inc. – pp.27-50.
69. 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.
70. Arc-Alert Circuit Interrupter Technology / Eaton Aerospace Group TF300-8G, Nov., 2010.
71. B.K. Mussmacher, W.L. Froeb. Controllers Guard Against Arc Faults / Power Electronics Technology, 2004.
72. Cronin M.J. The all-electric airplane as energy efficient transport // SAE technical paper series. 1980. -№801131 - p.1-12.
73. Cronin M.J. The impact of the all-electric airplane on production engineering // AIAA papers. 1981. - № 0848. - p. 243-247
74. D. A. Lee, A.M. Trotta, W.H. King. New Technology for Preventing Residential Electrical Fires: Arc-Fault Circuit Interrupters (AFCI).
75. D. Nemir, A. Martinez, B. Diong. Arc Fault Management using Solid State Switching / SAE Technical Paper Series 2004-01-3197.
76. Dodge M.W., Murrow T.R. Solid-state power controllers for flight test // Proc. of IEEE NAECON. 1974. - p.461-466.
77. Fox D.G. Integrated control techniques for advanced aircraft electrical power systems.// Proc. Of the 15 Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. -1980.-p. 54-58.
78. Friedman S.N. Solid-state power controllers meet system demands // ILC DATE DEVICE CORPORATION, AN/P-3.

79. G. Gregory, A. Manche. Arc Detection with the AFCI / IAEI News, July/August 2000.
80. Giovanni Artale, Antonio Cataliotti, Valentina Cosentino, Giuseppe Privitera. Experimental characterization of series arc faults in AC and DC electrical circuits / 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings – 2014.
81. Gold R.D., Kamps F.S. Solid-state power controllers for aircraft electrical power systems // ASE National Air Transportation Meeting. — 1970. -№ 700304.
82. Gyorki J.R. Bigger Role for Solid-state Relays // MACHINE DESIGN. -1989. - vol. 61. -№ 5. -p. 116-122.
83. Il-kwon Kim, Dae-won Park, Su-ycon Choi, Gyung-suk Kil. Detection and Analisis of Series Arc Discharge in Indoor Wiring Systems / Proc. The 7th WSEAS International Conference on Power Systems, Beijing, China, Sept. 15-17, 2007.
84. J. Brooks, G. Scott. Arc-Fault Circuit Interrupters for Aerospace Applications / 1999 society of Automative Engineers.
85. J.A. Wafer. The Evolution of the Arc Fault Circuit Interruption / 51st IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts.
86. J.K. Hastings, J.C. Zuercher, E. Hetzmanseder. Electrical Arcing and Material Ignition Levels / SAE Technical Paper Series, 2004-01-1565
87. Jackson K.R., Weaver W.B. Solid-state power controllers // Proc. of Symposium on advanced aircraft electrical systems. 1971. - p. 107-108.
88. Jerome K. Hastings, P. E., Joseph C. Zuercher, Ph.D., Engelbert Hetzmanseder Ph.D. Electrical Arcing and Material Ignition Levels. – EATON Corp., Innovation Center. 4201 N. 27th Street, Milwaukee, WI 53216, USA.
89. Kevin Mussmacher, P. E., William L. Froeb, National Hybrid Inc., Ronkonkoma, N.Y. Controllers Guard Against Arc Faults.
90. Kevin R. Wheeler, Dogan A. Timucin, Xander Twombly, Kai F. Goebel, Phil F. Wsocki. Fault Detection Challenge Problem. – NASA Ames Research Center Moffett

Field CA 94035. Survey. Prepared for the Aviation Safety Program Aircraft Aging & Durability Project as part of the Wiring

91. M. D. Mishrikey. Detection of Arcs in Automative Electrical Systems.

92. M. Ohrstrom. Fast Fault Detection for Power Distribution Systems/Licentiate Thesis Royal Instityte of Technology Departament of Electrical Engineering, Stockholm, 2003.

93. Mankovitz R.J. Solid-state power controllers, circuit breakers and relays forpercent-day aircraft // Proc. of Symposium on advanced aircraft electrical systems (SOSTEL). 1971. - p. 119-143.

94. N. I. Elkalashy. Modeling and Detection of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks.

95. Ormond T. Solid-state relays satisfy a wide range of switching needs // EDN. 1989. -№15. -p. 190-196.

96. R. Pappas. 115 Vac Single-Phase Arc-Fault Circuit Breaker Flight Test/DOT/FAA/AR-05/28.

97. R.A. Pappas, C. Singer, E. Taylor. Arc Fault Circuit Breaker Development and Implementation.

98. Richer G. Ferstenerbarer elektronischer Leistungsschalter. — Elektronik Industrie. 1991. - № 1. - p. 30-31.

99. S. Liao, R. Zhang, X. Li. Feature Extraction from Series Low-Voltage Arc Fault / Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 30th Nov., 2012, – № 2 – p. 45.

100. Schmalz S. Series electrical faults and characterization / Steve Schmalz – USA – 2006, December. – 145 p.

101. 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.

102. Shu-Chen Wang, Chi-Jui Wu, and Yi-Jie Wang. Detection of Arc Fault on Low Voltage Power Circuits in Time and Frequency Domain. – International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing.
103. Skamfer R.E. Compatibility of solid-state power controllers with aircraft electrical systems // Proc. of Symposium on advanced aircraft electrical systems. 1971. -p.143-155.
104. Sundberg G.R. Advanced in solid-state switching technology for large space power systems // Proc. of IEEE NAECON. 1984. -vol.1 - p.123-132.
105. Szekely V., Bien, T.V. Fine Structure of Heat Flow Path in Semiconductor Devices: A Measurement and Identification Method // SolidState Electronics, 1988 – p. 31.
106. T. E. Potter, M. Lavado. Arc Fault Circuit Interruption Requirements for Aircraft Applications / www.arc-shield.com
107. Westinghouse solid-state power controllers for Space Shuttle Orbiter // Interavia Air Letters. 1976. – №8587. – p. 7.
108. Home electrical fires // NFPA : [сайт] 2022. – URL: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/Electrical/Electrical>