

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»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва –2022 г.

Работа выполнена на кафедре 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете).

Научный руководитель: **Машуков Евгений Владимирович**, доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Лукин Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «ММП-Ирбис»

Овчинников Денис Александрович, кандидат технических наук, зам. главного конструктора по системам электропитания АО «ГК Электронинвест»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта (ЭКАО)

Защита состоится « **06** » **сентября** **2022** г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, корп. 57, ауд. 302.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте: <http://www.mai.ru/events/defence>.

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

Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07,
кандидат технических наук, доцент



Д.С. Дежин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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). В то же время 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 сетях с повышенным напряжением. К слову, данная проблема была решена исключительно конструктивными методами и до конца XX века данного 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 обоих авиационных происшествий являлось возгорание электропроводки из-за образования электрических дуговых разрядов. По данным Федерального управления гражданской авиации США за период с 1999 по 2021 год 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 для космической области, промышленной области (защита электросетей в жилых помещениях) для автомобильной отрасли (в рамках применения систем электроснабжения постоянного тока с повышенным напряжением 36...42 В), а также в рамках создания систем генерирования электроэнергии с использованием солнечных батарей в качестве первичного источника электроэнергии.

Основные разработки были сделаны специалистами следующих институтов: Helsinki University of Technology (Европа), Royal Institute of Technology (Европа), Sandia National Laboratories (США), University of Texas (США), 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,
- повышению вероятности 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 аппаратными 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.

Цель 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.

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

Объект 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.

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 в цепи не предоставляет преимущества 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. Основная часть работы изложена на 160 страницах, включающая в себя 90 иллюстраций и 6 таблиц. Список используемых источников включает 108 наименований. Общий объем работы – 172 страницы.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертационного исследования и задачи, которые необходимо выполнить для её достижения. Определены научная новизна и практическая ценность результатов исследования, представлена информация о структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе изложены результаты анализа известных методов обнаружения и ликвидации аварийных дуговых разрядов в наземных и бортовых электросетях, которые обнародованы в открытой печати в виде фундаментальных научных трудов, технических отчетов, обзоров, научно-технических статей, патентной литературы, начиная с 1998 года. Проведена классификация ранее опубликованных исследований по следующим критериям:

- физические принципы, лежащие в основе средств обнаружения дуги;
- тип применяемой силовой части в схемах ликвидации дуги;
- тип применяемой электроники в блоках распознавания и ликвидации дуги;
- место размещения датчиков дуги в электросетях;
- вид обнаруживаемых и ликвидируемых дуговых разрядов;
- характер изменений электросетей, вносимых средствами защиты от дуги;
- место размещения устройств обнаружения и ликвидации дуговых разрядов в электросетях.

Установлено, что наибольшее число публикаций посвящено методам обнаружения дугового разряда, реализованным как дополнение к автоматам защиты сети для промышленных и бытовых электросетей переменного тока, что объясняется их широкой распространенностью. Кроме того, опубликованы ряд исследований, направленных на создание автоматов защиты и коммутации постоянного тока для применения в области перспективных автомобильных, а также в первичных СЭС, в которых в качестве источника используются солнечные батареи.

Количество публикаций, посвященных способам защиты авиационных электросетей от аварийных дуговых разрядов относительно невелико. Данный факт объясняется наличием ряда неблагоприятных условий для работы средств защиты от дугового разряда: наличие широкополосных сетевых помех как от бортовой аппаратуры, так и от внешних источников, наличия импульсно-периодических нагрузок, присутствие большого числа информационных и

радиочастотных кабелей, отсутствие выделенного нулевого (минусового) провода, в качестве которого используется каркас ЛА.

Опубликованные методы обнаружения аварийных дуговых разрядов в промышленных и автомобильных электросетях не могут быть в чистом виде применены для авиационных электросетей по ряду причин:

— методы обнаружения дуги, которые подразумевают установку дополнительных датчиков в местах, удаленных от распределительных устройств, не могут быть применены из-за существенного увеличения массо-габаритных параметров бортовой кабельной сети ЛА;

— методы индикации дуги с низкой помехочувствительностью (оптические, тепловые и электромагнитные) не могут быть применены в составе авиационных электросетей, так как их внедрение требует кардинальных изменений в размещении кабельной сети на борту ЛА, перестройки структуры авиационных электросетей и прокладки дополнительных сигнальных проводов;

— электрические методы обнаружения дуги по наличию характерного широкополосного шума с хаотическим изменением электрических параметров обладают высокой помехочувствительностью, что приводит к большому количеству ложных срабатываний; при повышении их помехозащищенности, данные методы могут быть применены в авиационных электросетях;

— электрические методы обнаружения дуги, построенные с использованием микропроцессоров, не могут быть применены в составе авиационных электросетей, так как реализация данных методов на основе помехочувствительной микропроцессорной техники требует экранирования датчиков и отдельных элементов схем, что приводит к недопустимому (для авиационного оборудования) увеличению массо-габаритных характеристик.

Обнаружено, что подавляющее большинство публикаций направлено на создание блоков обнаружения дугового разряда для модернизации существующих тепловых автоматов защиты и коммутации. Практически не рассматривается применение транзисторных автоматов защиты и коммутации с использованием их диагностических возможностей для обнаружения аварийных токов нагрузки, их ограничения и отключения.

Установлено, что рассмотренные публикации 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.

Во второй главе представлены функциональная схема и имитационная компьютерная модель модернизированного транзисторного аппарата защиты и коммутации (АЗК) электросетей для переменного тока с функцией ограничения тока нагрузки. Предложен метод ликвидации аварийного дугового разряда параллельного типа, основанный на способности транзисторных аппаратов защиты к амплитудному ограничению тока.

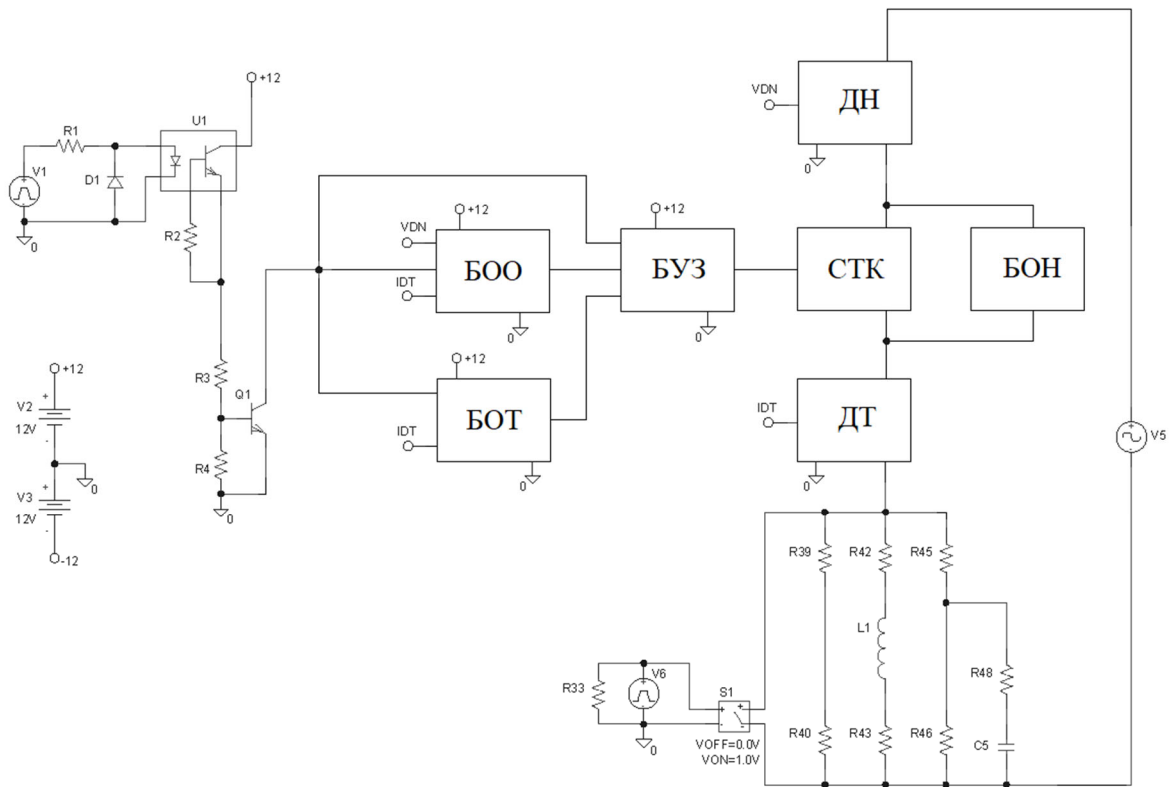


Рисунок 1 – Функциональная схема транзисторного АЗК (БОТ – блок ограничения тока, БУЗ – блок управления и защиты, СТК – силовой транзисторный ключ, ДТ – датчик тока, БОН – блок ограничения напряжения, БОО – блок организации отключения RL-нагрузок)

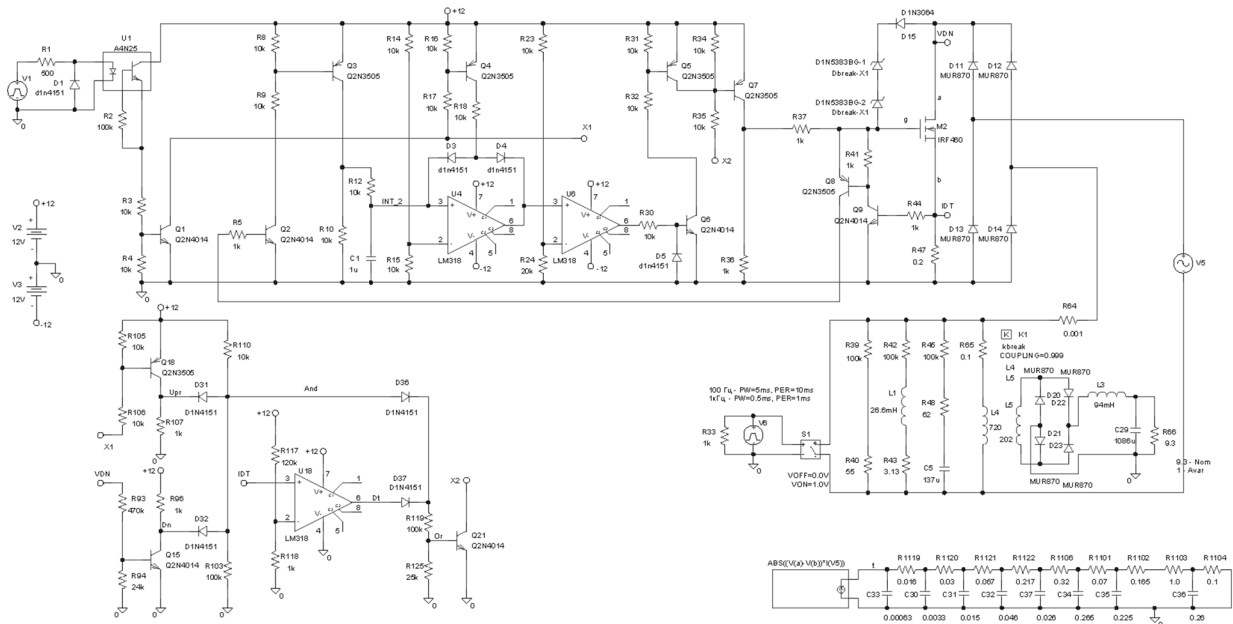


Рисунок 2 – Имитационная компьютерная модель транзисторного АЗК

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.

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

- коммутация активных, активно-индуктивных, 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 (рисунок 3, на котором наблюдается амплитудное ограничение тока нагрузки $I(R64)$ при $t=50-55, 60-62$ мс, что вызывает перегрев силового транзисторного ключа $V(t)$; наблюдается отключение нагрузки при превышении установленного времени амплитудного ограничения тока).

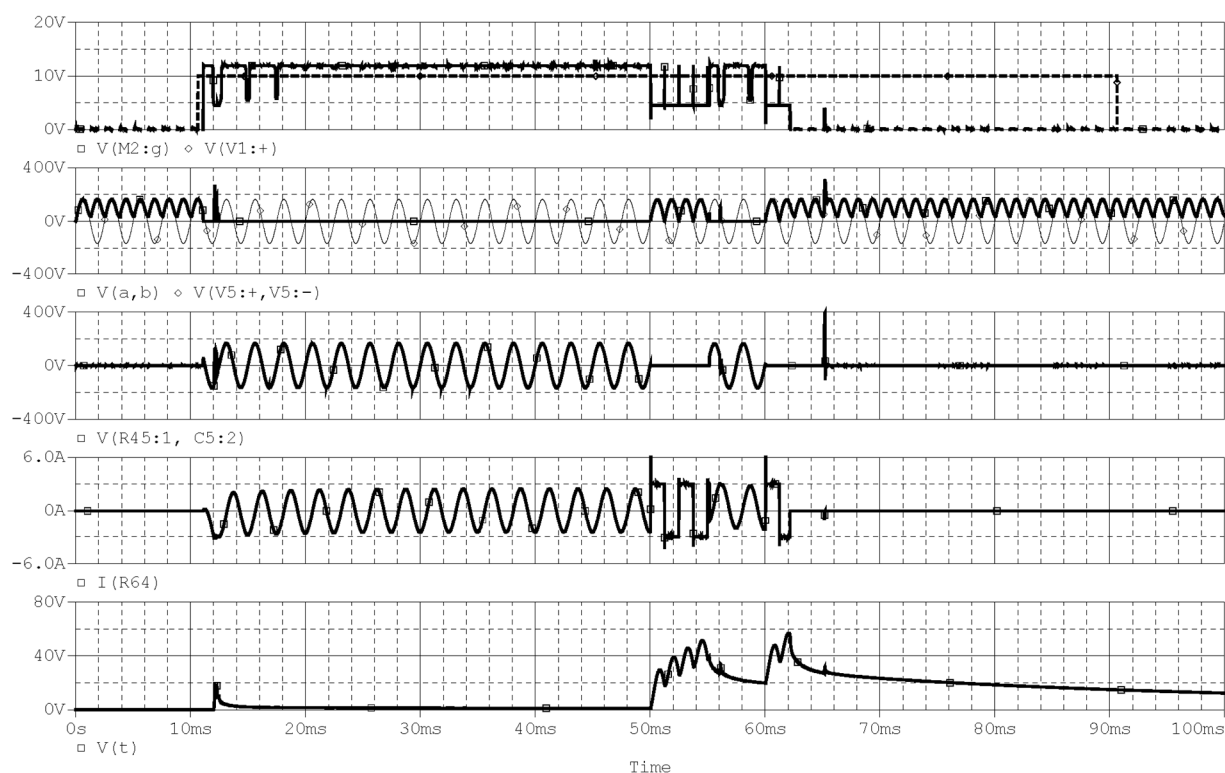


Рисунок 3 – Временные диаграммы тока, напряжений и температуры при коммутации RL нагрузки при возникновении при $t=50$ мс параллельного дугового разряда (перемежающегося короткого замыкания) с частотой 100 Гц

Проведено экспериментальное исследование предлагаемого метода ликвидации параллельной дуги (рисунок 4), результаты которого подтвердили способность транзисторного АЗК ликвидировать параллельную дугу с помощью встроенной функции ограничения токовых перегрузок.

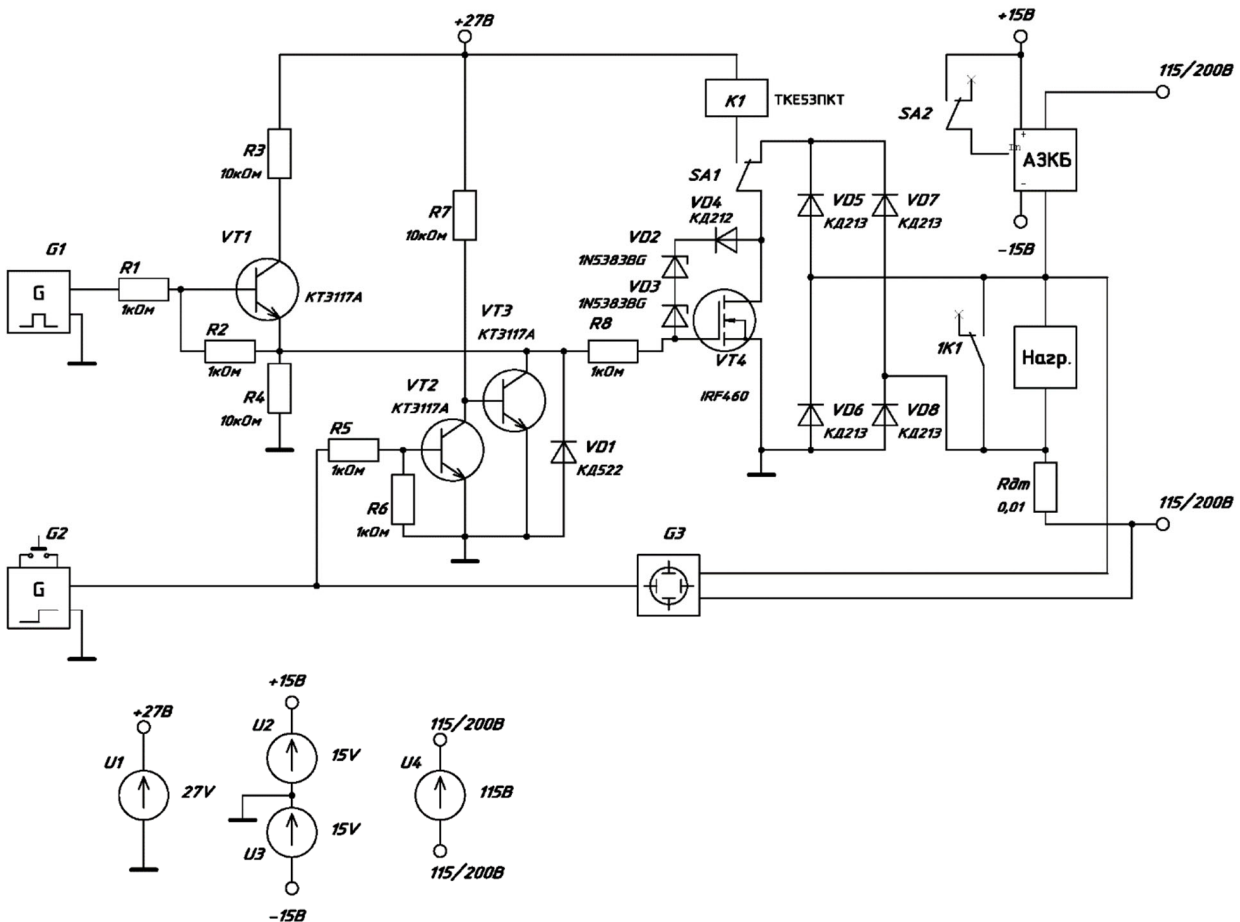


Рисунок 4 – Функциональная схема лабораторного макета для испытаний транзисторного АЗК переменного тока в режиме ликвидации параллельного дугового разряда.

В третьей главе исследованы характерные свойства последовательного дугового разряда в авиационных электросетях переменного тока. Установлено, что данный тип дугового разряда может возникать в электросетях при ослаблении болтовых соединений электрических контактов или при изломе жилы без нарушения изоляции.

Разработан лабораторный стенд, предназначенный для исследования процессов возникновения и горения последовательного дугового разряда в цепях переменного тока в контактной промежулке фиксированной длины (рисунок 5). Дополнительно был собран стенд для исследования процессов возникновения дуги при наличии механических вибраций.

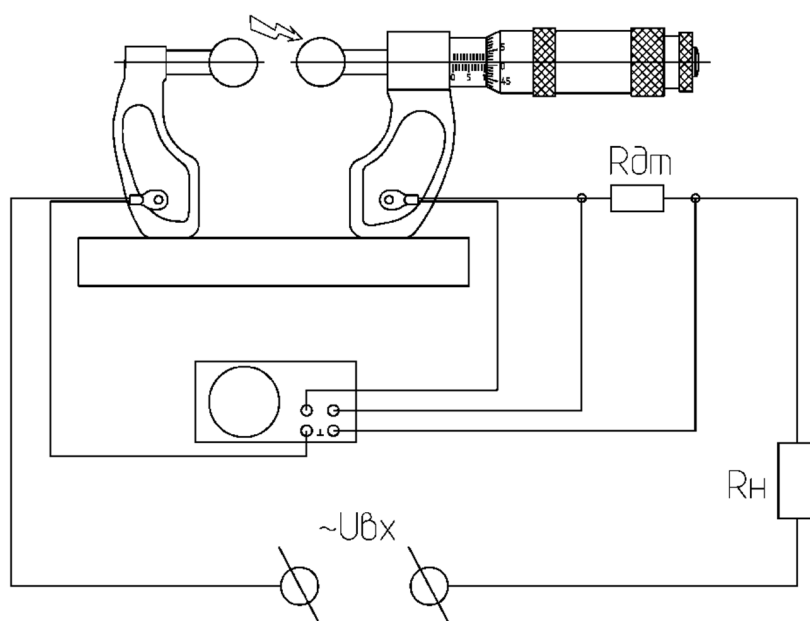


Рисунок 5 – Схема стенда для создания дуги в контактной промежутке фиксированной длины

Определено, что возникновение последовательных дуговых разрядов в сетях переменного тока происходит при величине напряжения не равном нулю; горение последовательной дуги носит периодический характер с прекращением дугообразования при токах и напряжениях близких к нулю, и повторным зажиганием при напряжениях отличных от нуля. При этом параметры напряжения повторного зажигания дуги изменяются случайным образом.

Экспериментальным путем определено, что горение последовательного дугового разряда может происходить в двух фазах: резистивной и плазменной, – которые могут чередоваться. Резистивная фаза сопровождается интенсивным разогреванием электродов, увеличением падения напряжения на участке цепи, отсутствием высокочастотных помех («широкополосного шума» дуги). Возникновение плазменной фазы горения дуги является спонтанным событием и сопровождается активным тепловым и световым излучением, значительным разогревом электродов, наличием плазменного столба между электродами с высокой температурой внутри, периодическим искрообразованием. Для плазменной фазы горения дуги также характерно специфическая осциллограмма напряжения и наличие широкополосного шума по каналу напряжения и тока (рисунок 6).

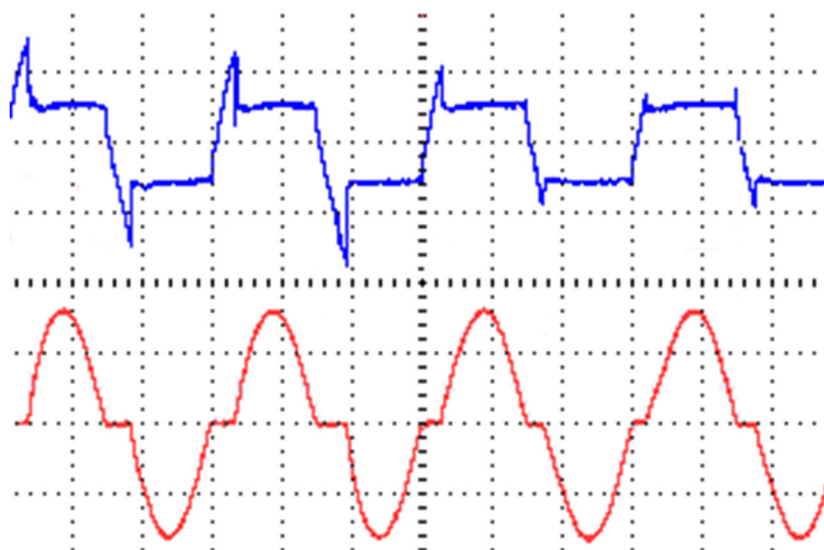


Рисунок 6 – Осциллограммы тока и напряжения плазменной фазы горения последовательной дуги переменного тока.

Обнаружено, что возникновение плазменной фазы горения последовательной дуги между медным и стальным электродами не сопровождается осциллограммами, показанными на рисунке 3. Осциллограммы тока и напряжения в данном случае аналогичны резистивной фазе горения дуги, то есть протеканию тока через металлический промежуток с высоким сопротивлением (рисунок 7).

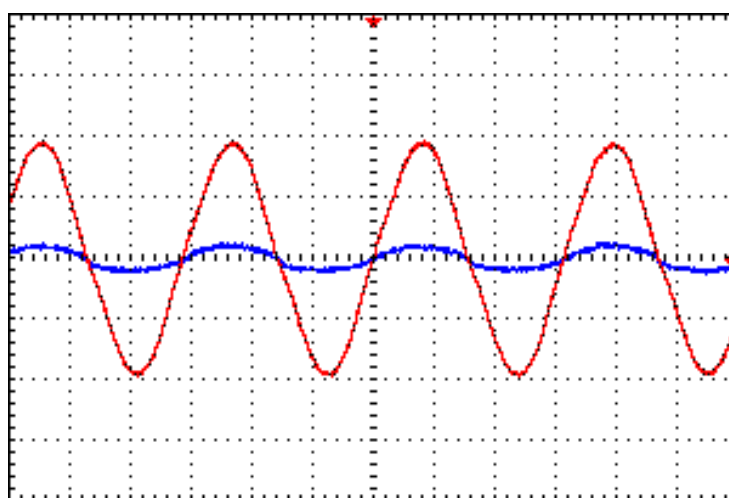


Рисунок 7 – Осциллограммы тока и напряжения резистивной фазы горения последовательной дуги или плазменной фазы горения дуги между медным и стальным электродом.

Определены факторы, которые встречаются при эксплуатации авиационного оборудования, оказывающие существенное влияние на возникновение последовательного дугового разряда:

— материал электродов (зажигание дуги облегчается, интенсивность плазменной фазы увеличивается при разных материалах электродов (медь-алюминий, медь-сталь, алюминий-сталь), что связано с уменьшением работы выхода электрона с поверхности одного из электродов);

— чистота поверхности электродов (наличие примесей уменьшает работы выхода электрона с поверхности металла и облегчает возникновение дуги);

— частота тока в цепи (значительное возрастание частоты тока уменьшает время паузы при горении дуги переменного тока, что облегчает её повторное зажигание; увеличение частоты с промышленных 50 Гц до авиационных 400 Гц не оказывает заметного влияния на повторное зажигание);

— тип нагрузки (наличие индуктивности облегчает процесс зажигания дуги).

С помощью вибрационного стенда установлено, что наличие широкополосной механической вибрации в диапазоне от 0 Гц до 2000 Гц (характерные для конструкций ЛА) приводит к возникновению широкополосного шума с хаотическим изменением параметров в канале тока и напряжения вне зависимости от материалов электродов и фазы горения дуги. Исходя из этого факта для дальнейшей разработки был выбран метод обнаружения последовательной дуги по хаотическому широкополосному шуму.

В четвертой главе изложены принципы построения, функциональные схемы и имитационные компьютерные модели методов обнаружения последовательной дуги по факту наличия хаотических изменений её параметров. Проведен сравнительный анализ для методов обнаружения хаоса с помощью:

- фазочастотного детектора;
- амплитудного детектора;
- ШИМ-детектора;
- амплитудно-частотного детектора.

Дополнительно исследованы методы обнаружения последовательной дуги по её характерным признакам:

- резкое изменение уровня производной тока;
- увеличение частоты повторений производной тока;
- наличие резких скачков тока;
- уменьшению действующего значения тока.

Для указанных методов проведен анализ по следующим критериям: помехочувствительность, быстродействие, сложность реализации на реальных компонентах. Для дальнейшей реализации блока обнаружения и ликвидации последовательной дуги в составе прототипа транзисторного автомата защиты и коммутации выбран метод обнаружения хаотического шума в канале тока с помощью амплитудно-частотного детектора (рисунок 8, 9).

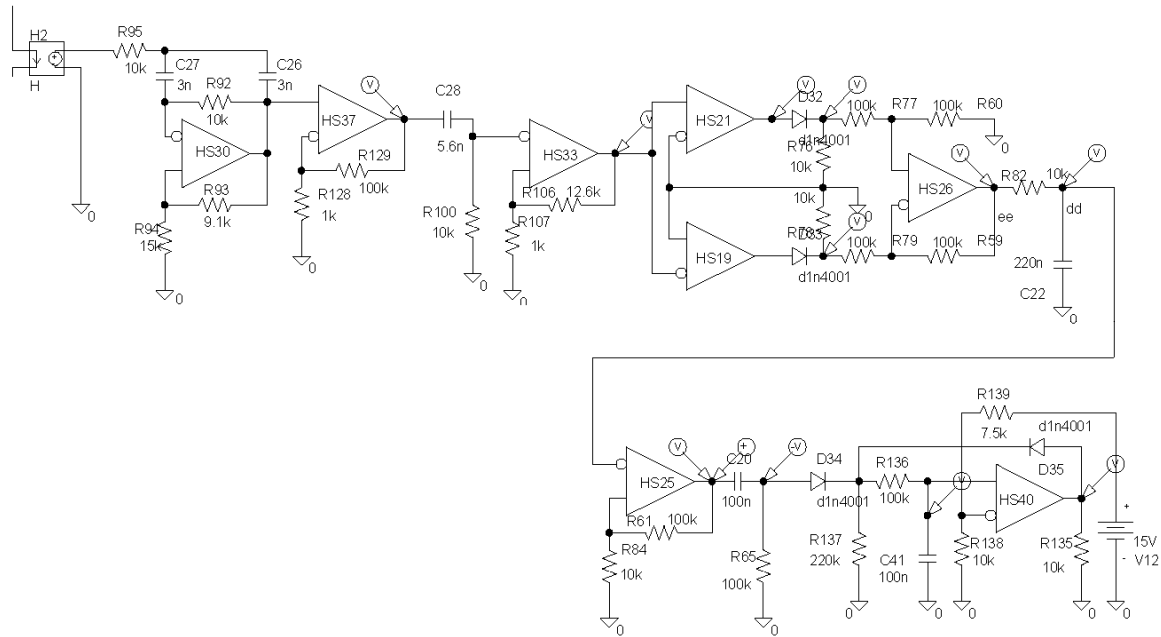


Рисунок 8 – Имитационная компьютерная модель метода обнаружения хаоса с помощью амплитудно-частотного детектора

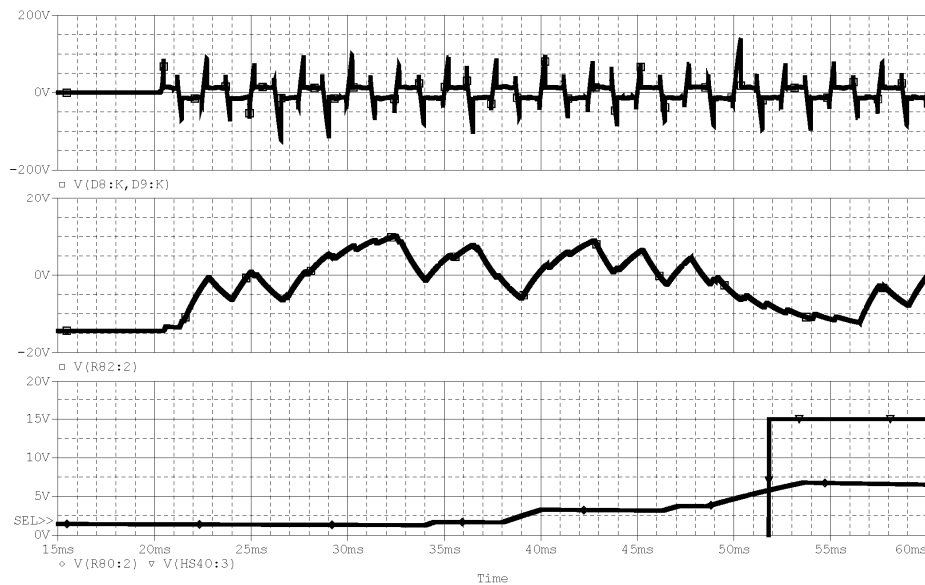


Рисунок 9 – Результаты моделирования работы блока распознавания дуги (график 1 – напряжение на участке с дугой, график 2 – выходной сигнал с блока обнаружения дуги, график 3 – сигнал с интегратора схемы обнаружения дуги и выходной управляющий сигнал)

В рамках исследования методов обнаружения последовательной дуги была разработана имитационная компьютерная модель формы тока и напряжения последовательного дугового разряда, предназначенная для сокращения трудоёмких манипуляций с реальной дугой (рисунок 10, 11).

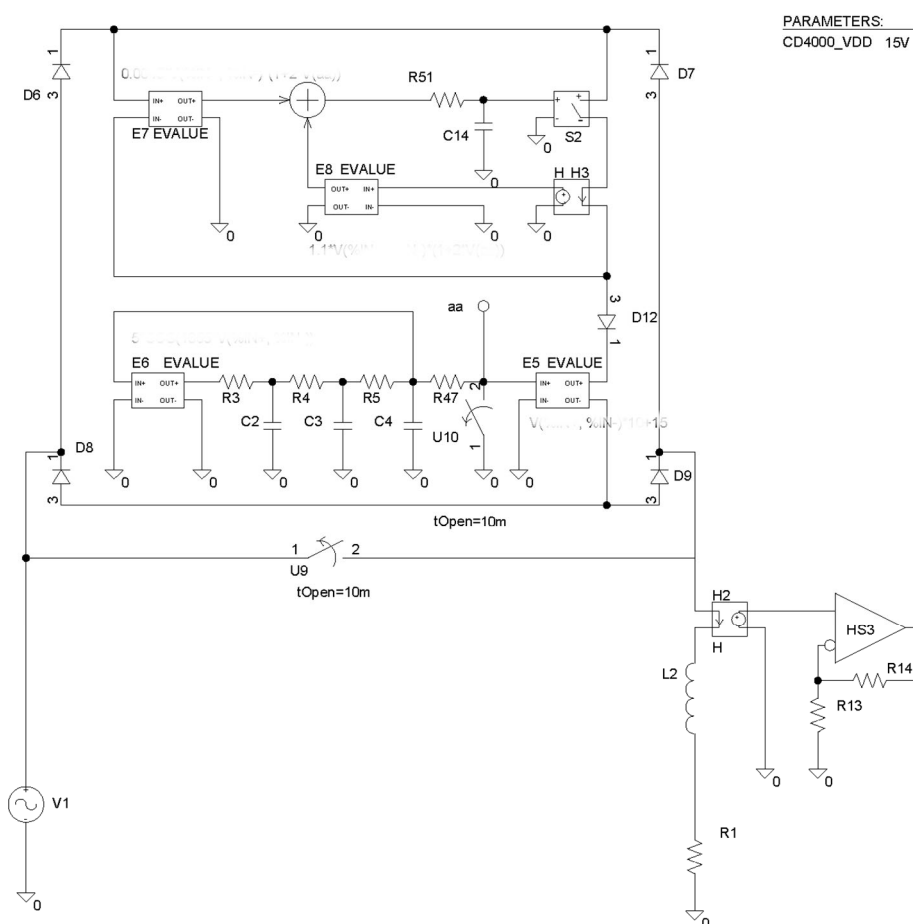


Рисунок 10 – Имитационная компьютерная модель формы тока и напряжения последовательного дугового разряда

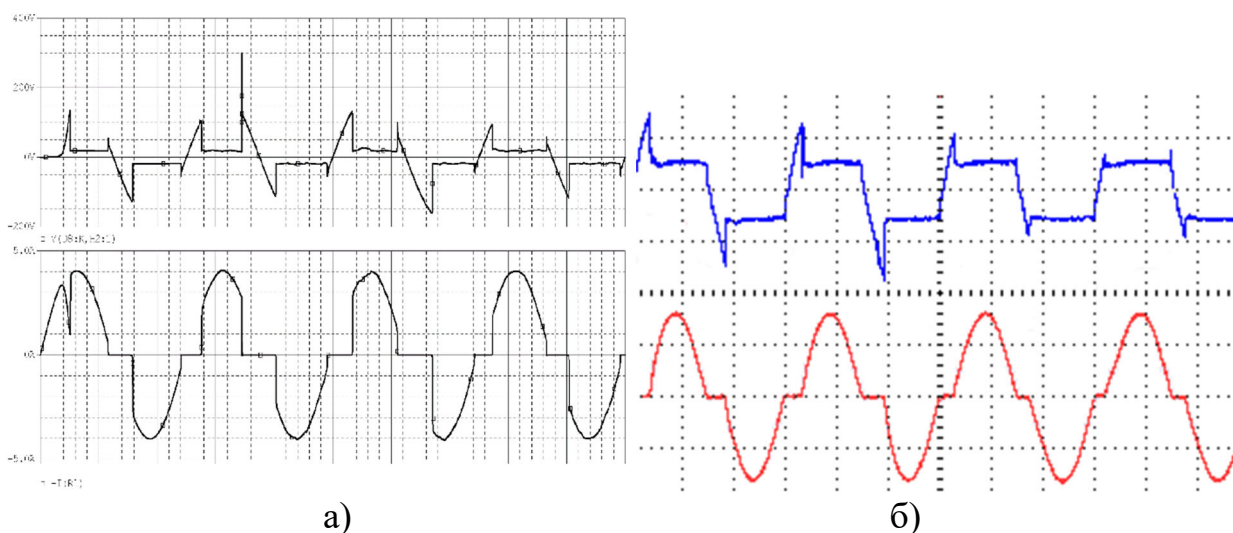


Рисунок 11 – Диаграммы токов и напряжений при горении последовательного дугового разряда
(а - по результатам компьютерного моделирования, б – по результатам экспериментального исследования дуги)

В процессе разработки модели были проанализированы несколько типов генераторов хаоса: 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. Для указанных типов генератора хаоса были разработаны имитационные компьютерные модели, проработаны технические средства их реализации на реальных компонентах, проведен их анализ по критериям реализуемости на реальных компонентах и по величине затрат вычислительной мощности на проведение компьютерного моделирования схемы, по результатам которого для реализации в составе компьютерной модели формы тока и напряжения последовательного дугового разряда был выбран генератор хаоса на базе математического блока с рекуррентивной последовательностью (рисунок 12, 13).

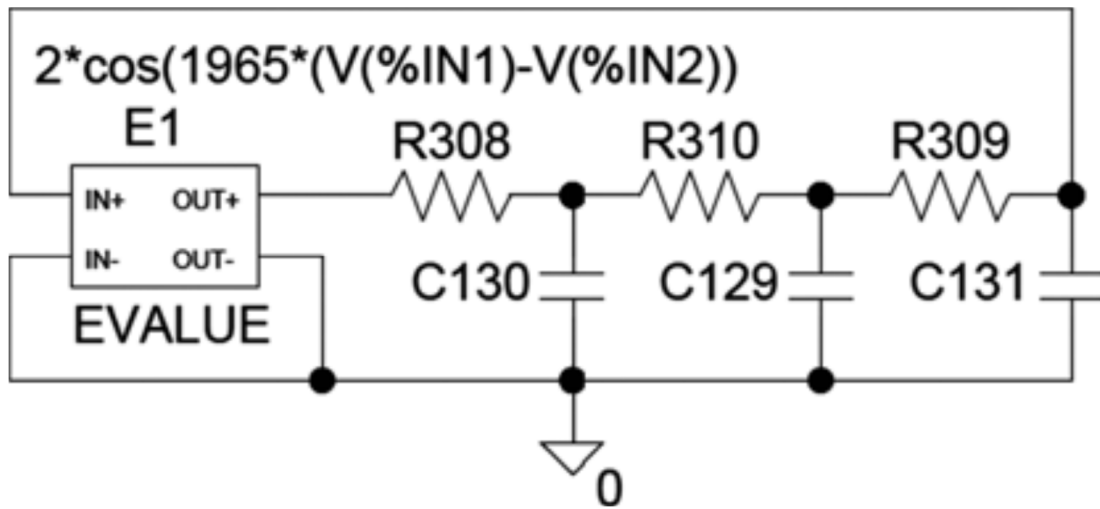


Рисунок 12 – Имитационная компьютерная модель генератора хаоса на базе математического блока с рекуррентивной последовательностью

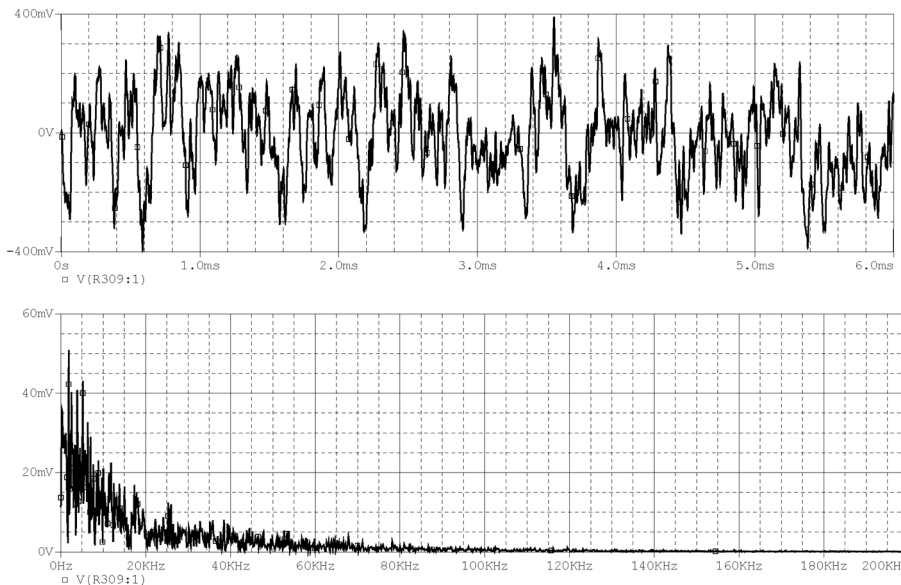


Рисунок 13 – Результаты моделирования модели генератора хаоса на базе математического блока с рекуррентивной последовательностью

В пятой главе изложены результаты лабораторных исследований и разработки макета транзисторного аппарата защиты и коммутации сети переменного тока с функцией обнаружения и ликвидации дугового разряда

(рисунок 14), подтверждающие корректную работу транзисторного АЗК при переменном токе с частотой 50Гц и 400 Гц (рисунок 15).

Определен состав и конструктивное разделение макета транзисторного АЗК, состоящий из платы управления, силового транзисторного ключа и блока обнаружения и ликвидации дуговых разрядов. Разработаны функциональные и структурные схемы, электрические принципиальные схемы макета, трассировка печатных плат (рисунок 16).

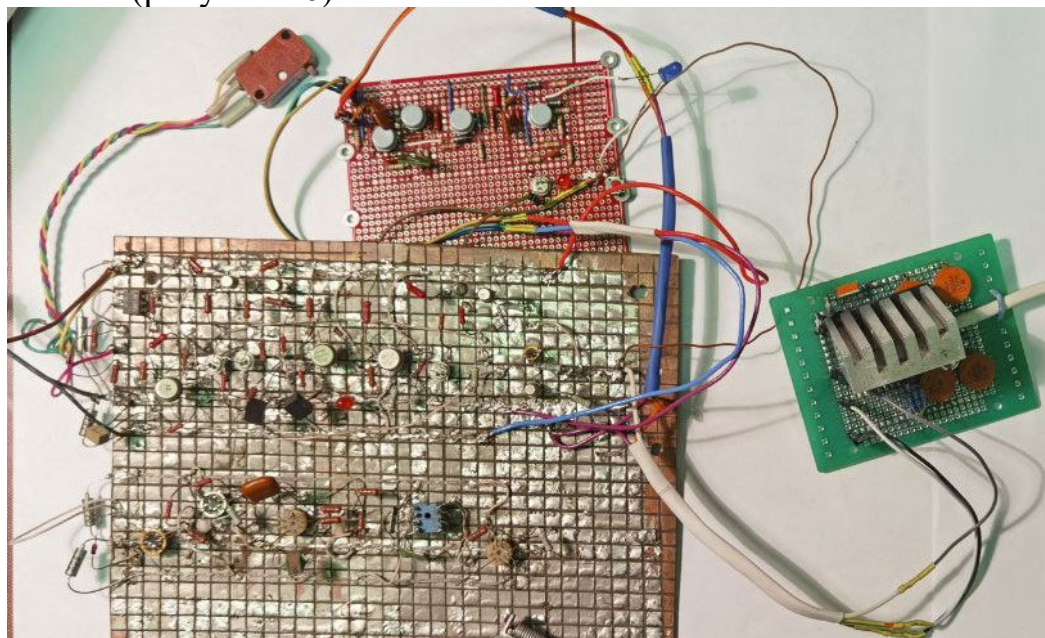


Рисунок 14 – Фотография макета транзисторного аппарата защиты и коммутации сети с функцией обнаружения и ликвидации аварийного дугового разряда

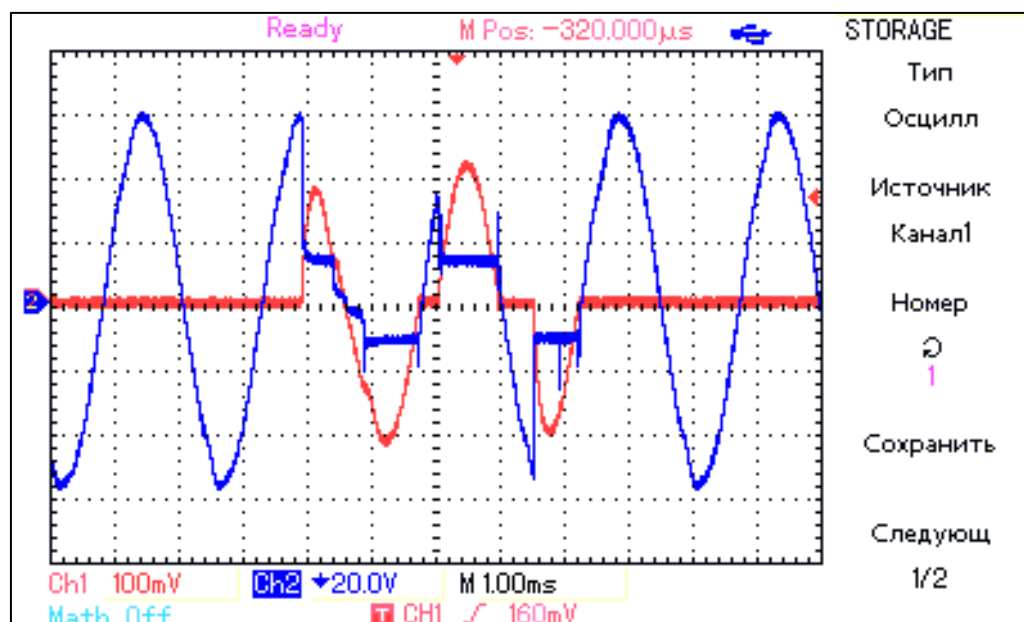


Рисунок 15 – Осциллограммы процесса ликвидации последовательной дуги в лабораторном макете.

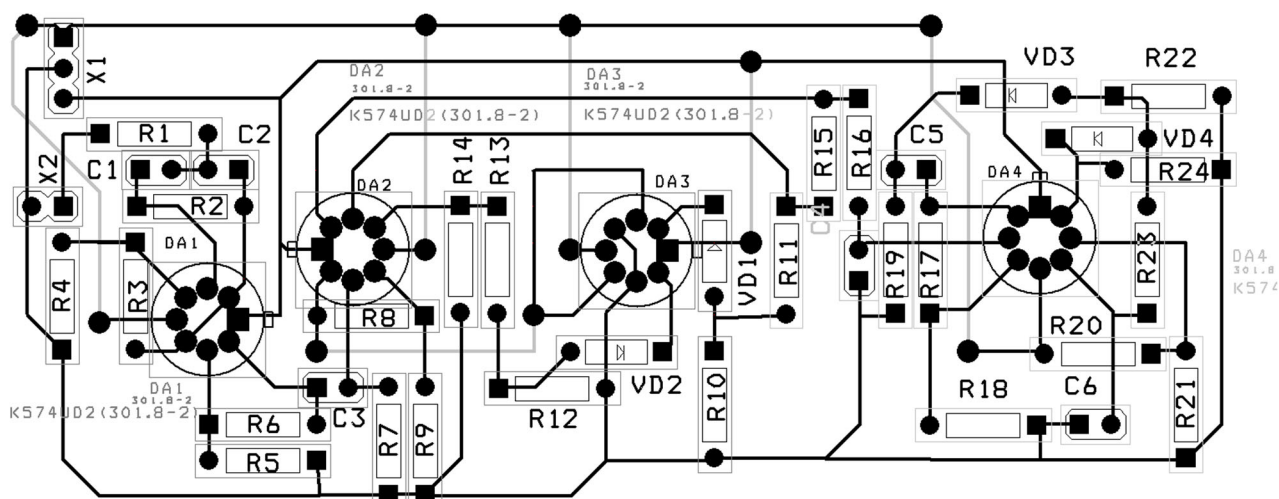


Рисунок 16 – Трассировка печатной платы макета блока обнаружения и ликвидации аварийного дугового разряда

Отмечено, что макет транзисторного АЗК собран на отечественной элементной базе (кроме силового транзисторного ключа), в качестве операционных усилителей был выбран ОУ типа К574УД2Б

Установлено, что разработанная схема транзисторного АЗК позволяет реализовать плату управления и блок обнаружения дуги на основе технологии базовых матричных кристаллов, что приближает массо-габаритные параметры транзисторного АЗК к параметрам цифровой техники, без необходимости проведения дополнительных работ по экранированию. Реализация макета транзисторного АЗК на технологии базовых матричных кристаллов не была реализована, ввиду ограниченного объема выпускаемых изделий и, как следствие, крайне высокой стоимости производства.

Следует отметить, что работоспособность макета была проверена только для активных нагрузок, ввиду отсутствия в лаборатории мощных авиационных потребителей переменного тока с другими характеристиками. Требуется проверка работоспособности макета с активно-индуктивными, емкостными нагрузками и нагрузками типа «вторичный источник питания». Кроме того, требуется оценка помехочувствительности разработанного макета при работе в условиях систем электроснабжения на борту ЛА.

В заключении приведены основные выводы и результаты диссертационной работы:

- 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) Разработаны 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК:

1. А.А. Притулкин. Анализ публикаций по способам и устройствам ликвидации аварийных дуговых разрядов в авиационных сетях переменного тока // Практическая Силовая Электроника №76. – М.:ММП-Ирбис, 2019. – с. 9–16
2. А.А. Притулкин. Анализ процессов коммутации и ликвидации параллельного дугового разряда для резистивных и индуктивно-резистивных нагрузок в авиационных сетях переменного тока // Практическая Силовая Электроника №79. – М.:ММП-Ирбис, 2020. – с. 39–44
3. А.А. Притулкин. Ликвидация в авиационных сетях переменного тока параллельного дугового разряда при коммутации емкостно-резистивных нагрузок и источников вторичного электропитания // Практическая Силовая Электроника №80. – М.:ММП-Ирбис, 2020. – с. 37–44
4. А.А. Притулкин. О свойствах последовательного аварийного дугового разряда в сетях переменного тока (часть 1) // Практическая Силовая Электроника №81. – М.:ММП-Ирбис, 2021. – с. 39–44
5. А.А. Притулкин. О свойствах последовательного аварийного дугового разряда в сетях переменного тока (часть 2) // Практическая Силовая Электроника №83. – М.:ММП-Ирбис, 2021. – с. 41–44
6. Е.В. Машуков, Д.А. Шевцов, А.А. Притулкин. Особенности горения и методы обнаружения последовательного аварийного дугового разряда // Практическая Силовая Электроника №85. – М.:ММП-Ирбис, 2022. – с. 29–35

Материалы научных конференций:

1. Притулкин А.А. Анализ публикаций по способам и устройствам ликвидации аварийных дуговых разрядов в авиационных сетях переменного тока // Гагаринские чтения – 2020. Сборник тезисов докладов XLVI Международной молодежной научной конференции, 2020 – с. 575.
2. Притулкин А.А. Исследование дугового разряда в авиационных сетях переменного тока // Гагаринские чтения – 2021. Сборник тезисов докладов XLVII Международной молодежной научной конференции, 2021 – с. 508.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в следующем: в [6] проведены экспериментальные работы с лабораторным стендом и сняты характеристики тока и напряжения при зажигании и горении последовательного дугового разряда в сетях переменного тока, на основе разработанных алгоритмов и структурных схем выполнено имитационное компьютерное моделирование блоков обнаружения последовательного аварийного дугового разряда последовательного типа.