



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Сафонов Евгений Павлович

**РАЗРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
ТОКОГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА
ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Фролов Владимир Яковлевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Растворова Ирина Ивановна**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электронных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург

Доброскок Никита Александрович
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой систем автоматического управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится «25» июня 2026 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета У.2.4.2.13 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, аудитория 150

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.4.2.13
кандидат технических наук, доцент



Иванов Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные автономные и изолированные электротехнические комплексы характеризуются как энергосистемы с высоким максимальным уровнем короткого замыкания (КЗ) (до 200–300 кА) в системах постоянного тока, которые уже превышают коммутационную способность используемых автоматических выключателей (АВ). Причиной данной проблемы является совокупность нескольких факторов. Во-первых, рассматриваемые энергосистемы при значительной плотности электрогенерации имеют короткие сети без существенной реактивности соединительных элементов. Во-вторых, данные энергосистемы, для своего функционирования или для повышения надёжности энергоснабжения, используют накопители энергии большой мощности с низким внутренним активным сопротивлением. Более того, дальнейшая тенденция на повышение мощности способствует увеличению объёма распределительной аппаратуры, что неизбежно приводит к увеличению интенсивности потока отказов. Другой причиной снижения надёжности рассматриваемых электротехнических комплексов является принятый порядок срабатывания коммутационного оборудования (селективность), из-за которого АВ у источников питания может длительно пропускать установившийся ток КЗ (до 1 секунды).

Ввиду этого, существующие возможные альтернативы АВ (такие как взрывные предохранители, схемы искусственной коммутации, полупроводниковые выключатели и тому подобное) не способны комплексно решить озвученные проблемы без снижения надёжности электроснабжения комплекса или могут привести к избыточным финансовым вложениям.

Наиболее эффективной стратегией борьбы с негативными последствиями рассматриваемых аварийных режимов является управляемое ограничение КЗ. Нов настоящее время опытно эксплуатируемые подходы к ограничению тока КЗ, такие как различные схемы токоограничивающих реакторов, нелинейных сопротивлений и полупроводниковых ограничителей, имеют множество недостатков – значительные массогабаритные показатели, дополнительная токовая нагрузка на элементы и так далее. Такого рода недостатки для рассматриваемых систем являются критическими, что требует новых схмотехнических решений, в частности на базе полупроводниковых устройств.

Сегодня компоновке автономных энергосистем с постоянным током отдают наибольшее предпочтение из-за многообещающих результатов развития технологий энергоёмких аккумуляторов, магнитогазодинамических генераторов и топливных ячеек, а также для уменьшения потерь и экономия пространства электростанции. Поэтому разработка новых токоограничивающих устройств для сетей постоянного тока, направленная на повышения устойчивости и надёжности работы электротехнических комплексов, является весьма актуальным вопросом и имеет важное прикладное значение.

Степень разработанности темы исследования. Научным и практическим исследованиям в области ограничения тока короткого замыкания посвящены работы следующих научных деятелей: Александров Г.Н., Брилинский А.С., Евдокунин Г.А., Стернин В.Г., Григорьев А.В. Необходимо уделить особое внимание авторам работ, посвященных разработкам и исследованию переходных процессов в полупроводниковых коммутационных аппаратах: Фролов В.Я., Кукеков Г.А., Васерина К.Н., Лунин В.П., Сосков А. Г. и Соскова И. А. Однако вследствие роста максимальных токов короткого замыкания и усложнения схем защищаемых энергосистем возникает необходимость в новых разработках и более глубокой проработке задачи ограничения аварийных токов для автономных электротехнических комплексов. К сожалению, несмотря на значительный объём работ, в данной области не было уделено должного внимания схемотехническим решениям управляемого ограничения аварийного тока на базе полупроводниковых устройств.

Объектом исследования является разработанное в диссертации электротехническое устройство для управляемого ограничения тока короткого замыкания, построенное на основе полупроводниковых приборов.

Предметом исследования являются электромагнитные переходные процессы в токоограничивающем устройстве автономного электротехнического комплекса и обусловленные ими тепловые режимы силовых полупроводниковых устройств.

Целью диссертации является разработка управляемого полупроводникового токоограничивающего устройства (ТОУ) постоянного тока для автономных электротехнических комплексов на основе предложенной методики расчета параметров его компонентов.

Для достижения этой цели требуется решение следующих конкретных *задач*:

1. Анализ селективности работы коммутационного оборудования на примере судовой энергосистемы и определение наиболее эффективной стратегии обеспечения надёжного электропитания ключевых узлов электротехнического комплекса.
2. Построение математической модели переходных процессов управляемого токоограничивающего устройства для сетей постоянного тока, основу которого составляет полупроводниковый тиристорный модуль с искусственной коммутации.
3. Разработка метода выбора и расчета параметров элементов разрабатываемого токоограничителя, которые учитывают эксплуатационные режимы работы этих элементов и их тепловое состояние для обеспечения надёжной работы элементов схемы при многократных аварийных перегрузках в сетях постоянного тока.
4. Разработка метода проведения экспериментального исследования разрабатываемого токоограничивающего устройства с целью валидации проведённого теоретического анализа.

Научная новизна

1. Разработан метод сравнительной оценки эффективности токоограничивающих устройств в аварийных режимах автономных судовых электротехнических комплексов, основанная на следующих критериях: степень снижения тока короткого замыкания и сохранение заданной селективности коммутационного оборудования.
2. Предложено новое управляемое полупроводниковое токоограничивающее устройство на базе тиристорного DC/DC преобразователя для сетей постоянного тока в составе автономных электротехнических комплексов с пониженной токовой нагрузкой на элементы схемы.
3. Разработан метод расчета параметров элементов предложенной схемы токоограничителя, работающего в условиях сети автономного электротехнического комплекса судовой энергосистемы, подтвержденная экспериментальными исследованиями.
4. Разработана новая динамическая модель, позволяющая осуществлять точный расчет предельного теплового состояния полупроводниковых устройств, работающих в составе предложенной схемы управляемого токоограничивающего устройства.

Теоретическая значимость работы

1. На основании анализа режима работы судовой энергосистемы и режимов короткого замыкания обоснован метод защиты от аварийных режимов работы с помощью управляемого ограничения тока для обеспечения селективной работы коммутационного оборудования.
2. Разработан метод экспериментальных исследований, подтверждающий эффективность работы предложенной системы управляемого токоограничивающего устройства.
3. Теоретическая значимость исследования подтверждена научно-исследовательской работой, выполненной в рамках исследований по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FSEG-2023-0012).

Практическая значимость работы

1. Обосновано решение проблемы селективности работы коммутационного оборудования в условиях короткого замыкания в судовой энергосистеме путём внедрения разработанного управляемого токоограничивающего устройства.
2. Приведённая комплексная методика выбора элементной базы разработанного токоограничивающего устройства нацелена на обеспечение предложенному схемотехническому решению высокой степени простоты применения, гибкости и универсальности с учетом аварийных режимов работы судовой энергосистемы.
3. Практическая значимость подтверждается актом внедрения результатов диссертационного исследования.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач были применены следующие методы научного исследования: расчетно-теоретическая проработка, компьютерное моделирование и эксперименты. В расчетно-теоретической проработке нашли в себе отражение итерационные методы (оптимизационные алгоритмы) решения неявно выраженных уравнений и методы расчета переходных процессов в электрических цепях путем решения дифференциальных уравнений. Компьютерное моделирование включало в себя разработку SPICE схем для исследования тепловых и электрических переходных процессов, а также написание программного кода для расчета параметров таких схем. Реализация экспериментальных методов представляло из себя сборку экспериментальных стендов и проведение на них опытов с целью верификации математических/компьютерных моделей и доказательства функциональной части работы исследуемого устройства.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Установлено, что стратегия длительного управляемого ограничения тока короткого замыкания является наиболее обоснованной для обеспечения высокой надёжности электропитания судового электротехнического комплекса, что подтверждено анализом аварийных переходных процессов на основе предложенной схемы замещения энергосистемы.
2. Предложена схема управляемого токоограничивающего устройства для сетей постоянного тока на базе тиристорного преобразователя с искусственной коммутацией, обеспечивающая длительное поддержание аварийного тока на заданном уровне без полного отключения цепи; достоверность положения подтверждена экспериментальными исследованиями.
3. Разработана тепловая модель полупроводниковых устройств, учитывающая нестационарные процессы при многократных аварийных импульсах тока, обеспечивающая высокую точность оценки предельной тепловой нагрузки; достоверность положения подтверждена экспериментальными исследованиями.

Степень достоверности результатов работы

Выполненные исследования и полученные выводы, представленные в диссертации, подтверждаются корректным использованием общепринятых методов математического моделирования. Соответствие предложенной схемы полупроводникового токоограничивающего устройства заявленным функциям и достоверность разработанных математических моделей, вместе с предложенными алгоритмами расчета их параметров, были доказаны экспериментально.

Апробация результатов

Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены, доложены, и получили одобрение на международной конференции:

1. Семинар по электротехнике, автоматизации и системам управления, теория и практическое применение – EEACS IEEE (г. Санкт-Петербург, 23–25 мая 2023 г.).

2. Также тема проблемы токоограничения в современных энергосистемах обсуждалась автором на следующих конференциях:

3. Международная конференция, посвященная 150-летию со дня рождения основателя электротехнического отделения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого - М.А Шателена, (г. Санкт-Петербург, 26–27 апреля 2016 г.).

4. Международная научная электроэнергетическая конференция: ISEPC-2021 (г. Санкт-Петербург, 17–19 мая 2021 г.)

Также материалы диссертации неоднократно обсуждались на научных семинарах ВШЭС ФГАОУ ВО СПбПУ.

Диссертация выполнена в рамках исследований по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FSEG-2023-0012).

Публикации

По теме диссертации были опубликованы 8 научных работ. Две из них опубликованы в журнале *Energies*, который индексируются в научных базах Scopus и Web of Science как Q2. Данные статьи, согласно рекомендациям научно-аттестационной комиссии от «18» ноября 2024 года №6/10, приравниваются к публикациям в журналах Перечня ВАК с присвоением категории К1. Одной из публикаций, согласно упомянутым рекомендациям, присвоена категория К3. Также был получен патент на полезную модель.

Личный вклад автора

Все основные результаты диссертационной работы получены соискателем лично. Автором был проведён анализ современного состояния исследуемой области и сформулированы задачи исследования. Автор самостоятельно разработал и реализовал предложенные в работе методики расчета с последующей интерпретацией полученных результатов. В ходе исследований автор принимал непосредственное участие в сборке экспериментальных стендов, в проведении экспериментов и в получении опытных данных. Автором осуществлялась организация и планирование экспериментов, а также обработка, анализ и обобщение полученных результатов.

Структура диссертационного исследования включает введение, пять глав, выводы по главам, заключение, список литературы (160 источников) и 13 приложений. Общий объем диссертации 185 страниц. В работе представлены 117 рисунков (включая 21 рисунок в приложениях), а также 8 таблиц (включая 2 таблицы в приложениях).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи и новизна научно-исследовательской работы, раскрыты теоретическая и практическая значимость результатов исследования, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Исследование автономных энергосистем в условиях возникновения тока короткого замыкания» исследуются режимы работы автономного электротехнического комплекса судовой энергосистемы в условиях возникновения КЗ.

Приведён краткий обзор по состоянию проблемы надёжности эксплуатации автономных электротехнических комплексов, связанной с тенденцией на увеличение максимального уровня тока КЗ, который уже сейчас достигает 300 кА и более. К таким электротехническим комплексам можно отнести мобильные энергосистемы и объекты добычи полезных ископаемых, что тесно связано с ограниченным пространством, высокой плотностью электрогенерации и широким применением устройств накопления энергии. В наибольшей степени рассматриваемая проблема выражена в судовых энергосистемах из-за перспективы быстрого роста мощности энергоустановок отечественного флота.

Были выявлены наиболее критические особенности аварийных режимов для рассматриваемой энергосистемы. Анализ литературы показал, что на текущий момент расчетные максимальные уровни токов КЗ в системе электроснабжения постоянного тока превышают коммутационную способность применяемых автоматических выключателей. Показано, что их замена на доступные в настоящее время альтернативы, имеющие опыт эксплуатации (например, такие как взрывные предохранители и резонансные выключатели), может негативно сказаться на надёжности энергоснабжения судового электротехнического комплекса. Исходя из данных обстоятельств был поднят вопрос о применении устройств управляемого токоограничения в качестве альтернативы выключателям высокой коммутационной способности. Также была рассмотрена специфика селективности работы коммутационного оборудования исследуемых энергосистем.

Проведён анализ существующих способов управляемого или длительного ограничения токов КЗ: токоограничивающие реакторы, устройства на основе материалов с положительным температурным коэффициентом, устройства на основе материалов с эффектом сверхпроводимости и полупроводниковые токоограничивающие устройства. Сделан вывод о перспективах применения полупроводниковых токоограничивающих устройств для сетей постоянного тока. Однако рассмотренные схмотехнические решения, с точки зрения применения в автономных электротехнических комплексах, требуют существенной доработки.

В конце первой главы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе «Разработка токоограничивающего устройства для автономного электротехнического комплекса на примере судовой энергосистемы» рассмотрен наиболее уязвимый с точки зрения аварии режим работы судовой энергосистемы, когда все источники питания системы подключены в параллельную работу. Схема замещения судовой энергосистемы для такого режима продемонстрирована на Рисунке 1.

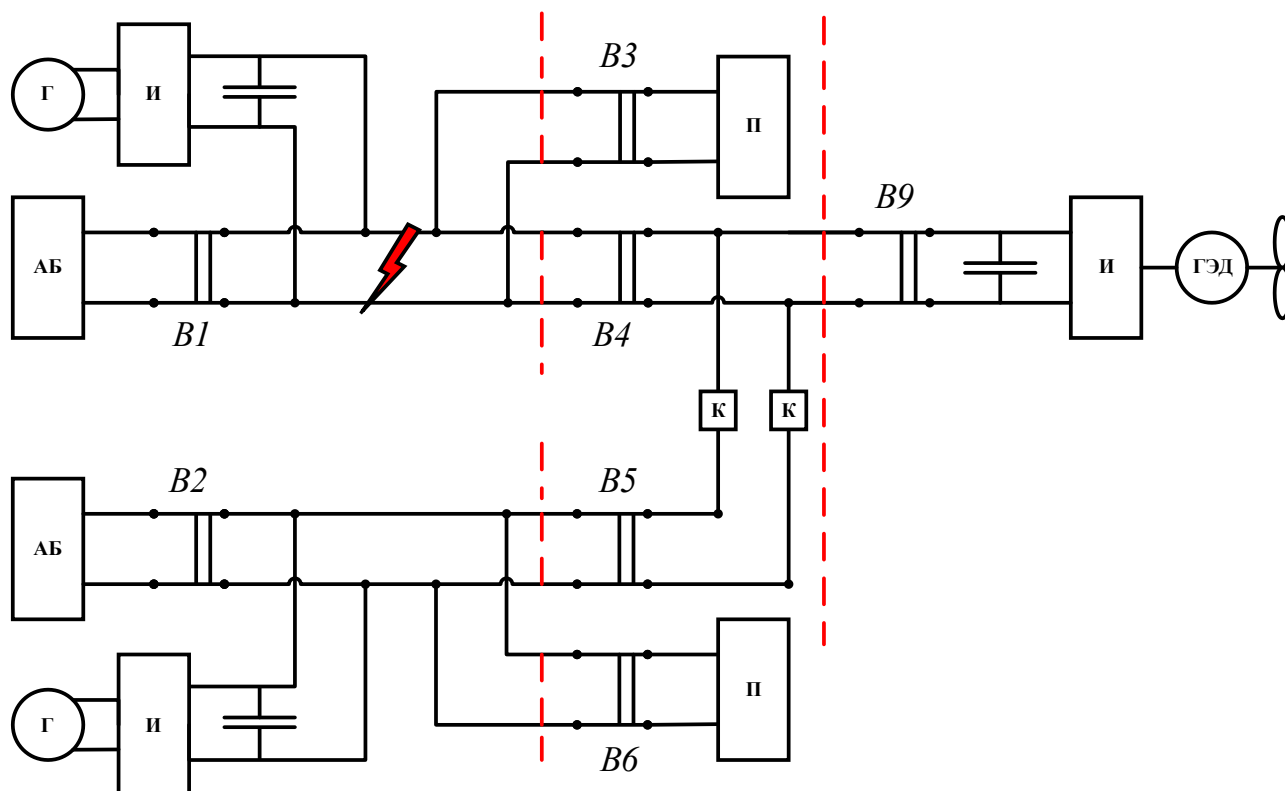


Рисунок 1 – Схема ЭЭС при параллельной работе всех источников питания. «Молнией» показан аварийный участок СЭС. Здесь «Г» – дизель-генератор; «И» – инвертор; «АБ» – аккумуляторная батарея; В1–В9 и «К» – коммутационные устройства; «П» – потребитель; «ГЭД» – главный электродвигатель

На основании данной схемы была разработана компьютерная модель, с помощью которой была раскрыта специфика селективности работы коммутационного оборудования рассматриваемой энергосистемы. Доказано, что управляемое ограничение аварийного тока является наиболее оптимальной стратегией борьбы с последствиями КЗ с точки зрения надёжности энергоснабжения судового электротехнического комплекса.

На Рисунке 2 показана предложенная к разработке схема управляемого полупроводникового токоограничивающего устройства (ПП ТОУ).

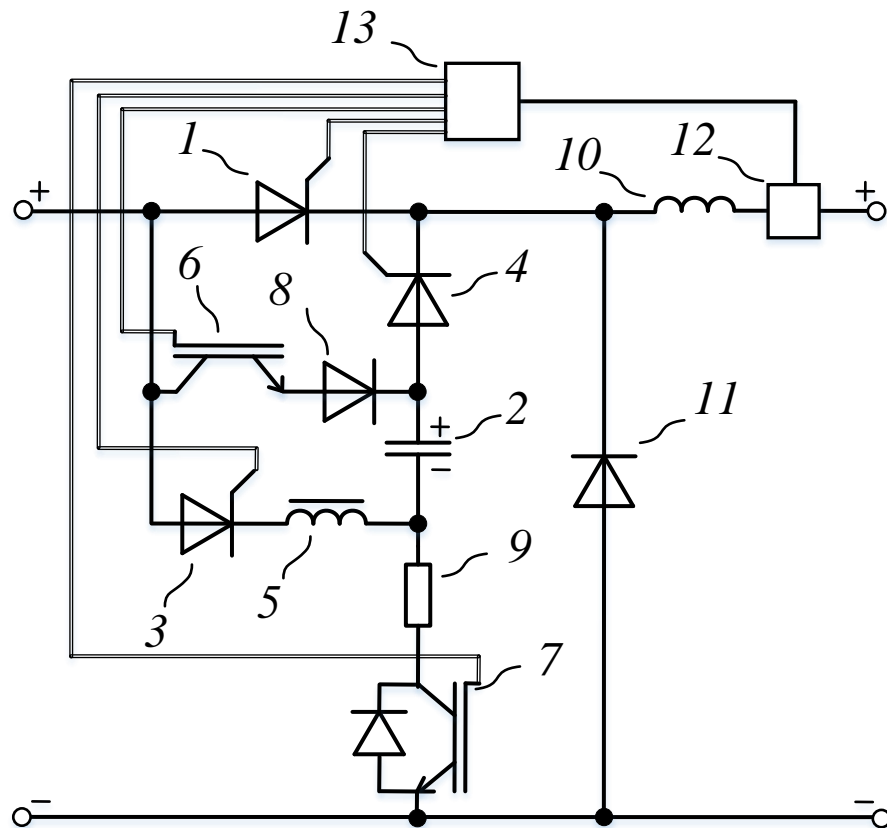


Рисунок 2 – Электрическая схема управляемого ПП ТОУ

В нормальном режиме работы энергосистемы ключ *1* находится во включенном состоянии (состояние схемы на Рисунке 2 показан на Рисунке 3, а, и временной интервал данного состояния до момента времени T_0 показан на Рисунке 3, д). В случае роста тока при возникновении КЗ в энергосистеме (схема на Рисунке 3, б, и процесс во временном интервале T_0-T_1 на Рисунке 3, д) разрядные тиристоры *3* и *4* подключают предварительно заряженную конденсаторную батарею (КБ) противотока, тем самым образуя контур искусственной коммутации основного тиристора *1*, доводя его ток до нуля с приложением обратного напряжения, тем самым надёжно отключая его (схема на Рисунке 3, в, и моменты времени T_1 и T_3 на Рисунке 3, д). После отключения основного тиристора *1* ток КЗ продолжает циркулировать в контуре поддержания тока (контур поддержания тока, образованный из элементов ($10-11-КЗ$)), медленно затухая (Рисунок 3, в, и временной интервал T_1-T_2 на Рисунке 3, д)). В это же время с помощью зарядных транзисторов *6* и *7* образуется контур из элементов («+»–*6*–*8*–*2*–*9*–*7*–«-»)), через который осуществляется заряд КБ противотока. Последующими этапами работы ПП ТОУ является повторное включение и отключение основного ключа и так далее, повторяя описанный выше цикл работы (повторяя переходные процессы временных интервалов T_3-T_2 и T_2-T_3 на Рисунке 3, д) до окончания работы токоограничителя.

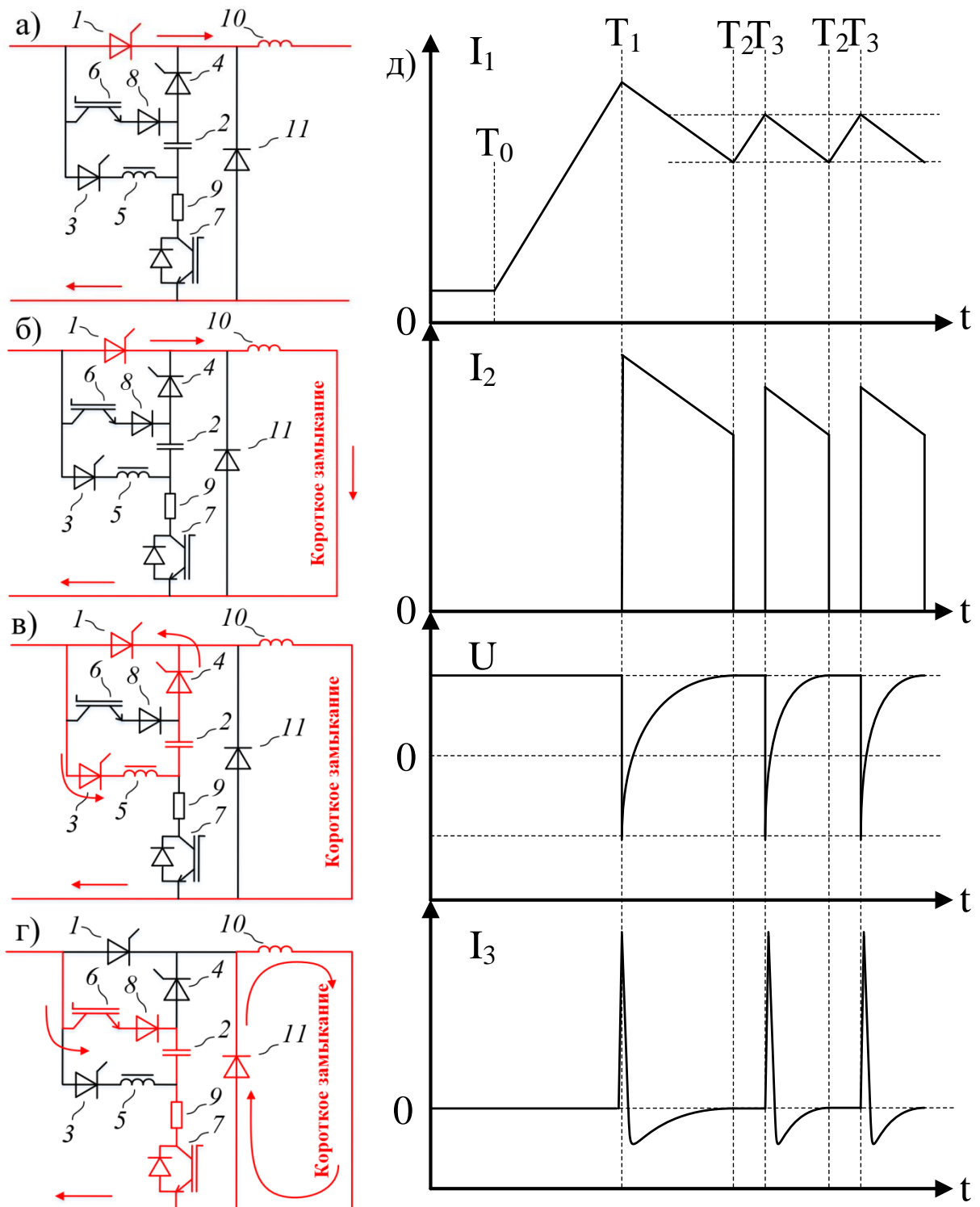


Рисунок 3– Этапы работы токоограничивающего устройства. а) нормальный режим работы (временной интервал до момента T_0 на Рисунке 3, д); б) рост тока в результате КЗ (временной интервал T_0 – T_1 на Рисунке 3, д) или в результате включения тиристора (временные интервалы T_2 – T_3 на Рисунке 3, д); в) искусственная коммутация тиристора 1 (моменты времени T_1 и T_3 на Рисунке 3, д); г) Тиристор 1 выключен. Затухание тока в контуре поддержания тока (временные интервалы T_1 – T_2 и T_3 – T_2 на Рисунке 3, д);

д) Общие осциллограммы токов и напряжения основных элементов схемы токоограничивающего устройства (I_1 –ток КЗ – в индуктивности 10; I_2 – ток диода 11; U – напряжение КБ 2; I_3 – Ток КБ 2)

Особенностью работы данной схемы являются следующие моменты. Ограниченное время работы такого устройства (до несколько секунд) позволяет использовать диоды и тиристоры на токах, значительно превышающих их номинальные значения (токи рабочих перегрузок), но без снижения надёжности работы этих ПП устройств. Заряд КБ противотока осуществляется в бестоковой паузе работы токоограничивающего устройства (когда основной тиристор I выключен – интервал времени $T_3 - T_2$), что снижает нагрузку на КБ 2 и основной тиристор I . Это позволяет значительно сократить количество ПП устройств в сборках и объём КБ, что помимо экономии позволит повысить надёжность эксплуатации токоограничивающего устройства, или, при неизменном количестве компонентов, увеличить его мощность. Дополнительными преимуществами исследуемого устройства является сокращение массы и габаритов всего ТООУ на заявленную мощность, а также высокая степень гибкости в выборе его компонентов, что в свою очередь позволяет создать токоограничитель на широкий диапазон номинальных напряжений, номинальных токов и параметров КЗ. Отдельно отметим реактор $I0$, который предполагает малые массогабаритные параметры за счет малого значения индуктивности, необходимой для работы рассматриваемого ПП ТООУ.

В третьей главе для достижения поставленных задач необходимо рассчитать электрические параметры элементов схемы ТООУ на Рисунке 1. Для этого из схем замещения и анализа их переходных процессов была получена следующая система уравнений:

$$I_{min} = \frac{-\frac{(R_d \cdot t_{off} - 2 \cdot L)}{(2 \cdot L + R_d \cdot t_{off})} \cdot \left(I_{dop} + \frac{2 \cdot t_{on} \cdot U_s}{(2 \cdot L + R_{Th} \cdot t_{off})} \right)}{1 + \frac{(R_{Th} \cdot t_{on} - 2 \cdot L) \cdot (2 \cdot L - R_d \cdot t_{off})}{(2 \cdot L + R_d \cdot t_{off}) \cdot (2 \cdot L + R_{Th} \cdot t_{on})}}, \quad (1)$$

$$I_{max} = \frac{-I_{min} \cdot (R_{Th} \cdot t_{on} - 2 \cdot L) + 2 \cdot t_{on} \cdot U_s}{(2 \cdot L + R_{Th} \cdot t_{on})}, \quad I_{ave} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}, \quad (2)$$

$$t_{on} = \frac{D}{f}, \quad t_{off} = \frac{1}{f} - t_{on}, \quad (3)$$

$$t_1 = \frac{\arccos\left(\frac{(I_{ave} + I_{puls})/I_1}{I_1}\right) - \pi/2}{\omega_1}, \quad t_2 = \frac{\omega_2}{\arcsin\left(\frac{U_c(0) + U_s}{\omega_2 \cdot L \cdot I(0)}\right)}, \quad (4)$$

$$C \cdot U_s^2 = L_{di} \cdot I_1^2, \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{C \cdot L_{di}}}, \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{C \cdot L}}, \quad (5)$$

$$I_{dop} = I' + I'', \quad I' = \frac{U_s \cdot t_1}{L}, \quad (6)$$

$$I'' = \left((U_c(0) + U_s) \cdot \frac{t_2}{2} + U_s - \frac{U_c(0) + U_s}{2 \cdot L \cdot C} \cdot \left(\frac{t_2}{2}\right)^3 - \frac{I(0)}{C} \cdot \left(\frac{t_2}{2}\right)^2 \right) / 2 \cdot L - \frac{I(0)}{2}. \quad (7)$$

где входными (известными) параметрами системы приняты: I_{max} – максимальный ток на выходе ТООУ (в индуктивности $I0$ на Рисунке 2); I_{min} – минимальный ток на выходе ТООУ; I_{puls} – амплитуда пульсаций ограниченного тока; $L_{di/dt}$ – индуктивность для защиты тиристора от эффекта di/dt ; I_{ave}

– среднее значение ограниченного тока; U_s – напряжение источника питания; R_d – сопротивление диода $I1$; R_{Th} – сопротивление основного ключа I . Выходными (неизвестными) параметрами данной системы являются: L – индуктивность на выходе ТООУ $I0$; t_{on} – время включенного состояния основного ключа I ; t_{off} – время выключенного состояния основного ключа I ; D – скважность работы основного ключа I ; f – частота работы ТООУ; I_{dop} – дополнительный ток разряда конденсатора 2, который состоит из суммы двух компонентов, обозначенных как I' и I'' , соответствующие двум этапам разряда конденсатора 2, длительность которых составляет t_1 и t_2 соответственно; ω_1 – собственная частота колебания контура первого этапа разряда, состоящая из элементов 2 и 5; ω_2 – собственная частота колебания контура второго этапа разряда, состоящая из элементов 2 и 12; $U_C(0)$ – напряжение на конденсаторе в момент окончания первого этапа разряда; $I(0)$ – ток в момент окончания первого этапа разряда.

Для определения последовательности расчета системы (1)-(7) была составлена диаграмма взаимосвязи ее параметров, показанная на Рисунке 4.

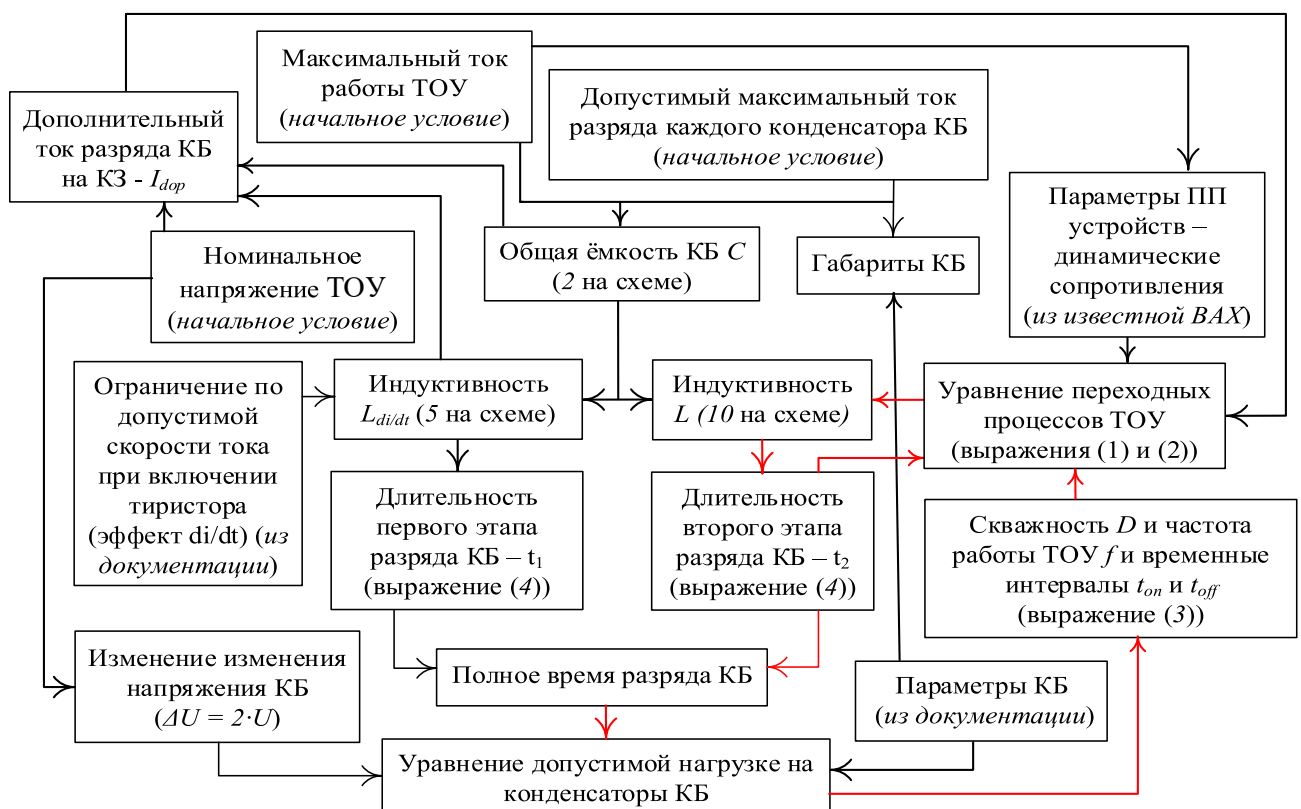


Рисунок 4– Диаграмма системы взаимосвязи параметров исследуемого ТООУ (номера разделов и приложения соответствует диссертации)

Из-за тесной связи параметров элементов и режима работы схемы образуются зацикленные пути (выделено красными линиями на Рисунке 4) порядка расчета. Для их разрешения предложен порядок расчета через итерационный алгоритм, показанный на Рисунке 5.

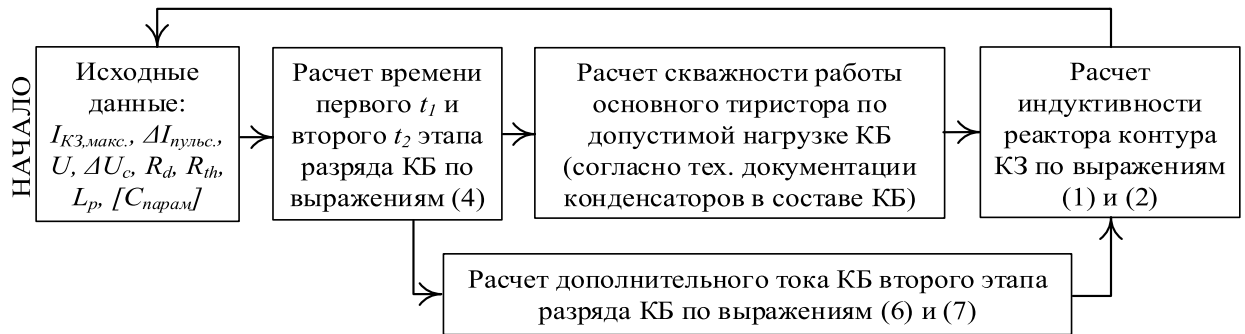


Рисунок 5 – Рекомендованный порядок расчета системы на Рисунке 4

Для расчета были приняты следующие параметры, представленные в Таблице 1:

Таблица 1 – Исходные данные для алгоритма расчета параметров ТОО

Обозначение	Параметр	Значение
$U_s, U_{КБ}$	Напряжение источника питания / предварительного заряда КБ	660 В
$I_{КЗ,срел}$	Средний ограничиваемый ток КЗ	40 кА
$\Delta I_{КЗ,пульс}$	Размах пульсаций ограничиваемого тока КЗ	6 кА
ΔU_C	Размах напряжения на КБ	1320 В
L_p	Индуктивность устройства ограничения di/dt	0,2 мкГн
R_d	Сопротивление диода контура КЗ	0,089 Ом
N_d	Количество параллельно соединённых диодов контура КЗ	3 шт.
R_t	Сопротивление основного тиристора	0,1 Ом
N_t	Количество параллельно соединённых основных тиристоров	3 шт.

Расчет по алгоритму был проведен среди 60-ти вариантов КБ, для каждого из которых были получены параметры ТОО. В Таблице 2 были представлены наиболее оптимальные варианты: относительно низкая индуктивность реактора L и меньший объём КБ, что в свою очередь улучшает массогабаритные показатели ТОО.

Таблица 2 – Рассчитанные параметры ТОО

Наименование конденсатора	C_k , мкФ	L , мкГн	F , Гц	D	V , м ³ (КБ)	$t_{он}$, мкс	N , шт. (конд. в КБ)
K75–83	8	7,643	26,362	0,000976	0,0117	37,025	135
K75–83	10	9,508	20,788	0,001188	0,0108	57,138	100
K78–41	4	13,764	14,358	0,001113	0,009907	77,544	430
K78–47	6	17,740	11,211	0,000991	0,011842	88,424	430
K78–41	6	18,081	10,928	0,001277	0,009324	116,893	287

Для проверки результатов расчета данные параметры были применены в модели Matlab Simulink (Рисунок 6), схема которой была построена на основе схемы на Рисунке 2. Результаты моделирования данной модели с параметрами из Таблицы 2 показаны на Рисунке 7.

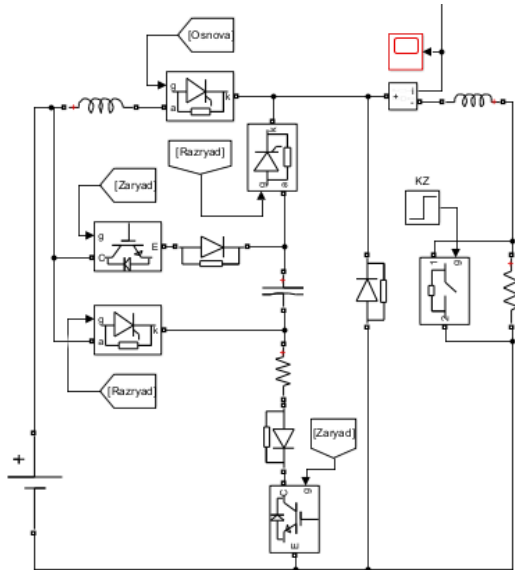


Рисунок 6 – Реализация схемы исследуемого ТОУ в Matlab Simulink

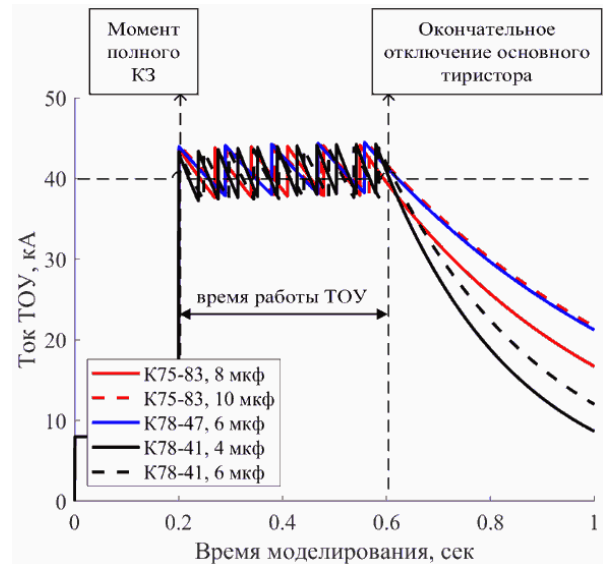


Рисунок 7 – Результаты моделирования схемы на Рисунке 6 по параметрам из Таблицы 2

Соответствие результатов моделирования установленным начальным условиям в широком спектре параметров показал высокую степень устойчивости предложенных алгоритмов и высокую точность решения.

В четвёртой главе в целях наиболее точного описания теплового состояния полупроводниковых устройств, была разработана новая динамическая модель ПП устройства и предложен метод расчета ее параметров.

Разработанная модель имеет в своей основе два основных компонента, как показано на Рисунке 8: модель диода Д173–4000, построенная на известном выражении ВАХ ПП устройств, и тепловая схема данного ПП устройства, построенная на принципе электротепловой аналогии. Выходным значением используемой модели теплозависимой ВАХ (ее кривые приведены на Рисунке 9) является мгновенная мощность диода в широком температурном диапазоне, которая используется для расчета температуры структуры ПП устройства через метод электротепловой аналогии. В свою очередь полученная температура рп-переходов поступает обратно в модель ВАХ и так далее.

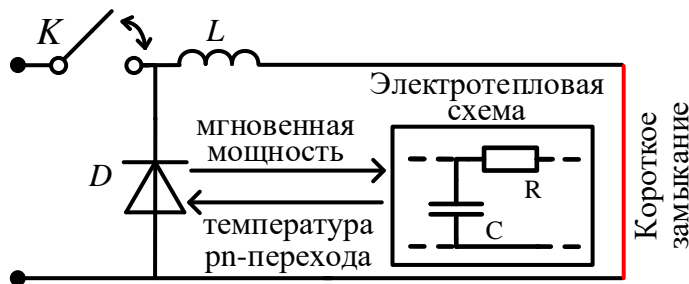


Рисунок 8 – Схема тепловой модели диода в составе ТОУ

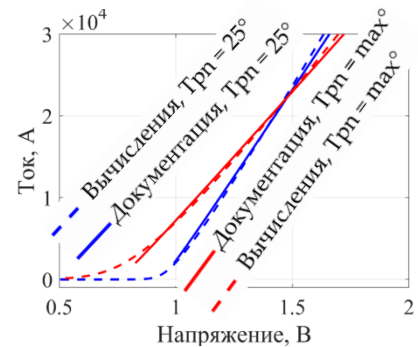


Рисунок 9 – ВАХ Д173–4000

Использование такого подхода позволяет производить динамический расчет теплового состояния различных слоёв полупроводникового устройства для любой формы и длительности импульса. Схема легко интегрируется в MATLAB/Simulink благодаря удобству моделирования динамических процессов. Это позволяет оценивать тепловое состояние ПП устройств при моделировании работы исследуемого ТООУ в рамках одной модели.

В работе представлен метод определения параметров применяемой модели ВАХ, опирающийся на полуэмпирические данные из технической документации ПП устройства.

Расчет параметров схемы электротепловой аналогии, осуществлялся на основе известной из технической документации переходного теплового сопротивления Z_T . Для расчета параметров элементов такой схемы (тепловые сопротивления и теплоёмкости различных слоёв ПП устройства) был предложен метод, функциональная схема которого изображена на Рисунке 10.

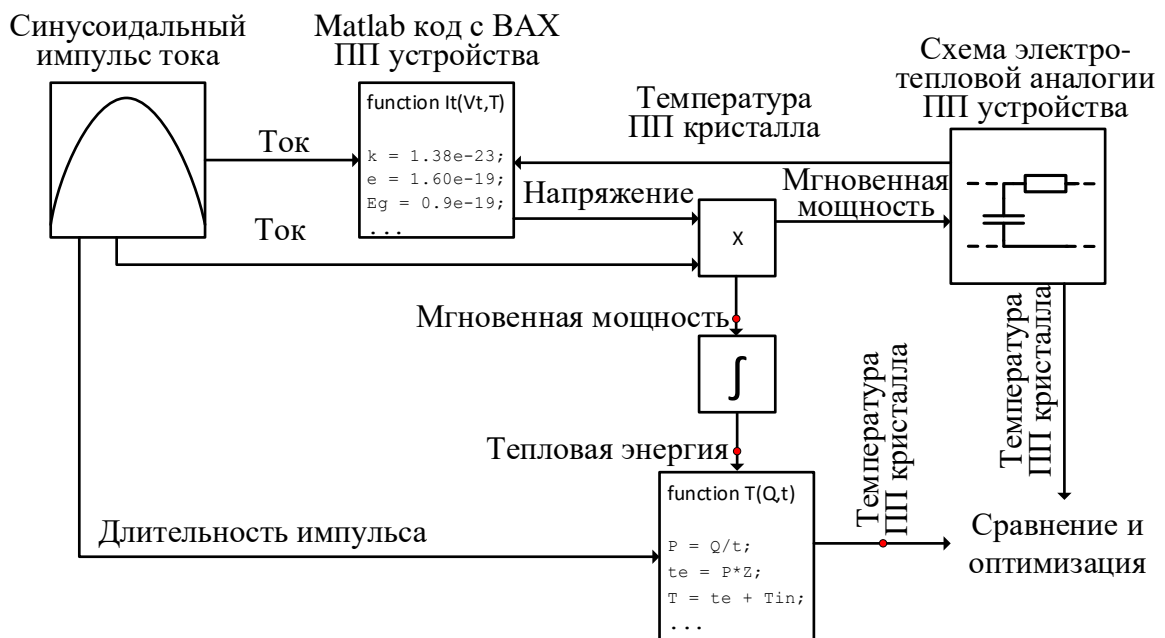


Рисунок 10 – Функциональная схема реализации алгоритма расчета параметров эквивалентной тепловой модели полупроводникового устройства в среде Matlab Simulink

Суть методики состоит в подборе рассматриваемых параметров таким образом, чтобы один импульс тока заданной длительности (t') вызывал идентичный нагрев в двух моделях: зависимость $f(t') = Z_T$ из технической документации и расчет изменения температуры рп-перехода через ее тепловую схему. Алгоритм реализации предложенной методики показан на Рисунке 11.

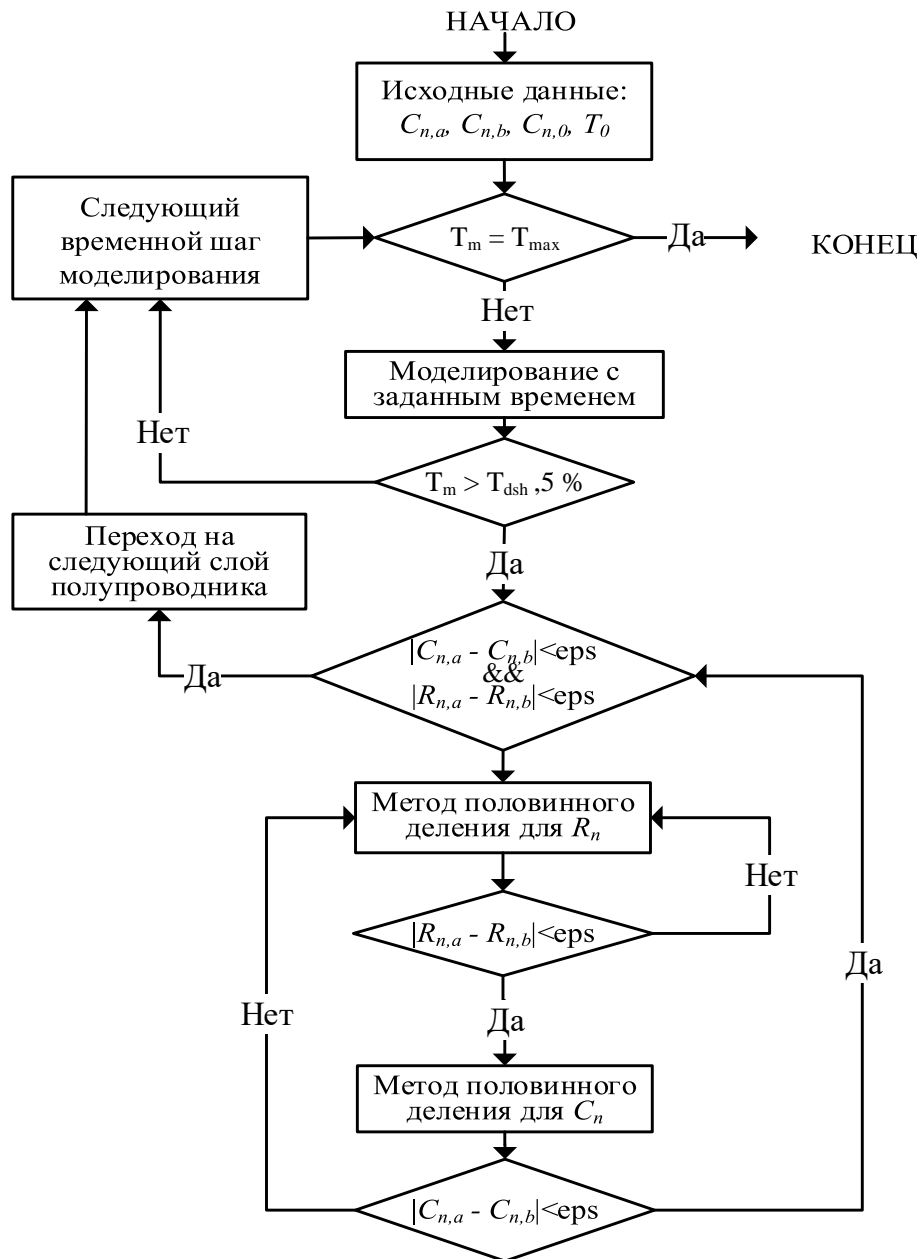


Рисунок 11 – Алгоритм расчета параметров схемы электротепловой аналогии полупроводникового диода или тиристора

В результате работы алгоритма были рассчитаны параметры тепловой схемы замещения для некоторых ПП устройств, которые использовались для экспериментальных опытов и проектировании мощного прототипа. Полученные параметры тепловых сопротивлений и тепловых ёмкостей различных уровней структуры диодов и тиристорov сопоставимо с реальными параметрами этих устройств, что косвенно подтверждает достоверность расчетов.

Выше представленный метод был применён для параметров тепловой модели: $C_1 = 2,122$ [Дж/К], $R_1 = 3,47 \cdot 10^{-4}$ [К/Вт], $C_2 = 2,696$, $R_2 = 3,47 \cdot 10^{-4}$, $C_3 = 7,119$, $R_3 = 1,91 \cdot 10^{-3}$, $C_4 = 71,282$, $R_4 = 1,91 \cdot 10^{-3}$, $C_5 = 672,319$. Здесь индексами обозначены номер RC-слоя схемы электротепловой аналогии (слой l – pn-переходы и так далее).

Для расчета нагрузки на диод Д173-4000 (11 на Рисунке 2) в составе управляемого ТООУ на основе схемы на Рисунке 8 была составлена тепловая модель, показанная на Рисунке 12.

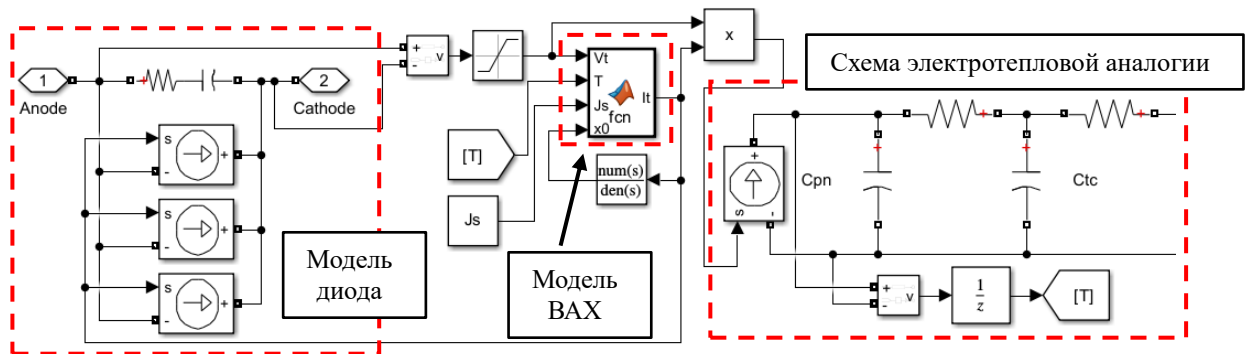


Рисунок 12 – Реализация тепловозависимой модели ПП устройств в среде Matlab Sumulink

Были приняты следующие параметры моделирования: установившийся ток КЗ (без ограничения) – 210 кА; время переходного процесса КЗ – 10 мс; время токоограничения – 400 мс; частота и скважность работы ключа К – 30 Гц и 0.6 % соответственно; напряжение – 660 В; индуктивность L – 10 мкГн; температура T_0 и T_{\max} рп-перехода – 25°C и 175°C; количество диодов в параллельной сборке – 3. ВАХ диода показана на Рисунок 9 (получены по выражениям 11 и 12). Результаты моделирования (ток на выходе ТООУ или ток в L на Рисунке 10, а, и температура рп-перехода на Рисунке 10, б) показаны далее на Рисунке 13:

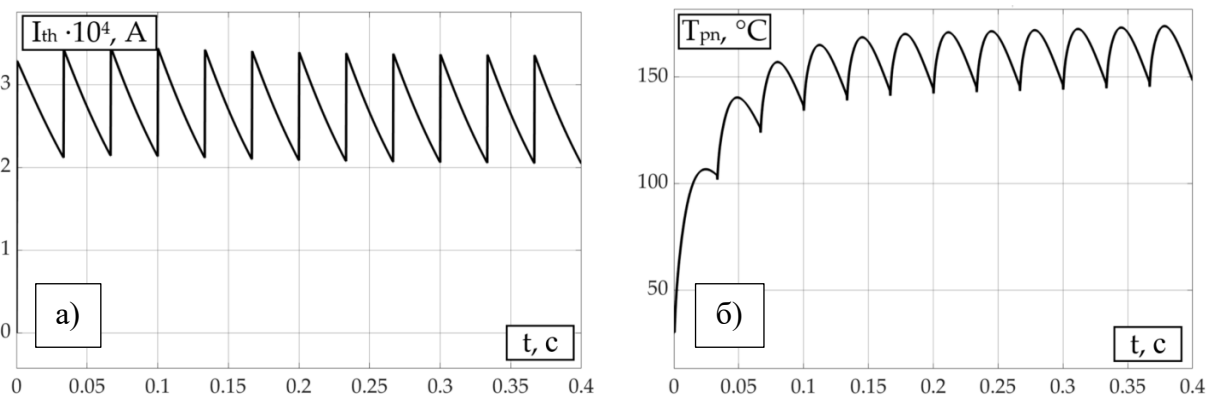


Рисунок 13 – Результаты моделирования схемы на Рисунке 12. Время моделирования 0.4 с: а) ограниченный ток КЗ; б) Температура рп-перехода диода

В пятой главе для верификации разработанных моделей и методик были проведены несколько экспериментов. Целью первого эксперимента стала верификация тепловой модели поведения ВАХ ПП устройства работы и методики расчета тепловой схемы замещения ПП устройства. Для этого через тиристор модели Т243–400 с помощью КБ был пропущен мощный импульс тока, посредством измерения падения напряжения на тиристоре, была осуществлена оценка нагрева его рп-перехода, которая, в свою очередь, сравнивалась с результатами рассчитанной тепловой модели. Для формирования этого импульса по схеме на Рисунок 14, а, была собрана установка, показанная на Рисунке 14, б и в.

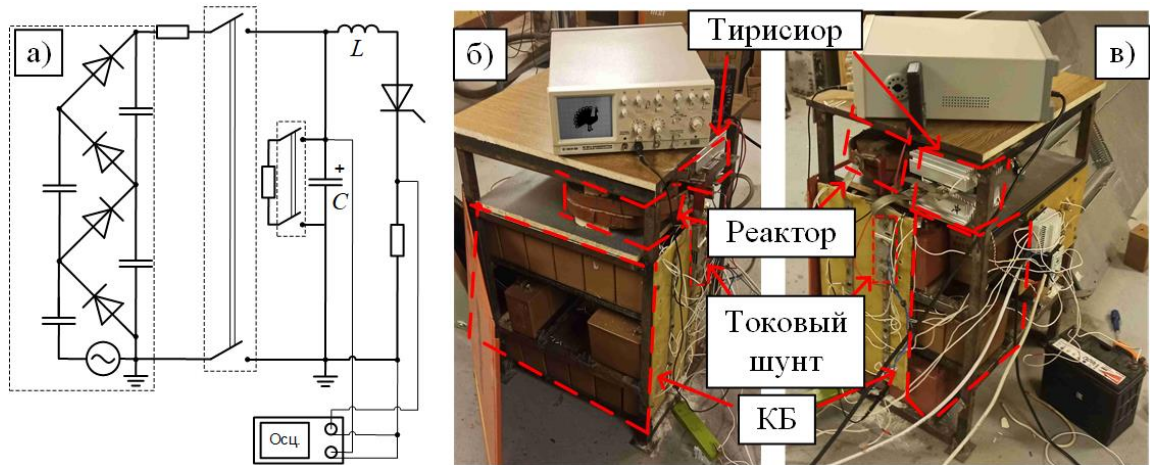


Рисунок 14 – Стенд для первого эксперимента. а) Упрощенная электрическая схема; б) Фотографии внешнего вида экспериментальной установки (вид 1); в) Фотографии внешнего вида экспериментальной установки (вид 2)

Сама установка представляет из себя колебательный LC-контур. Конденсатор из этого контура заряжается с помощью умножителя напряжения. Инициализация разряда данного конденсатора осуществляется с помощью тиристора, который и сам является объектом исследования. Амплитуда синусоидальной полуволны тока длительностью 1,3 мс составляет ≈ 9 кА.

В целях верификации были выведены динамические вольтамперные характеристики T243–400, полученные в результате расчета и эксперимента (Рисунок 15). Максимальная температура компьютерной модели тиристора составила 108.6°C .

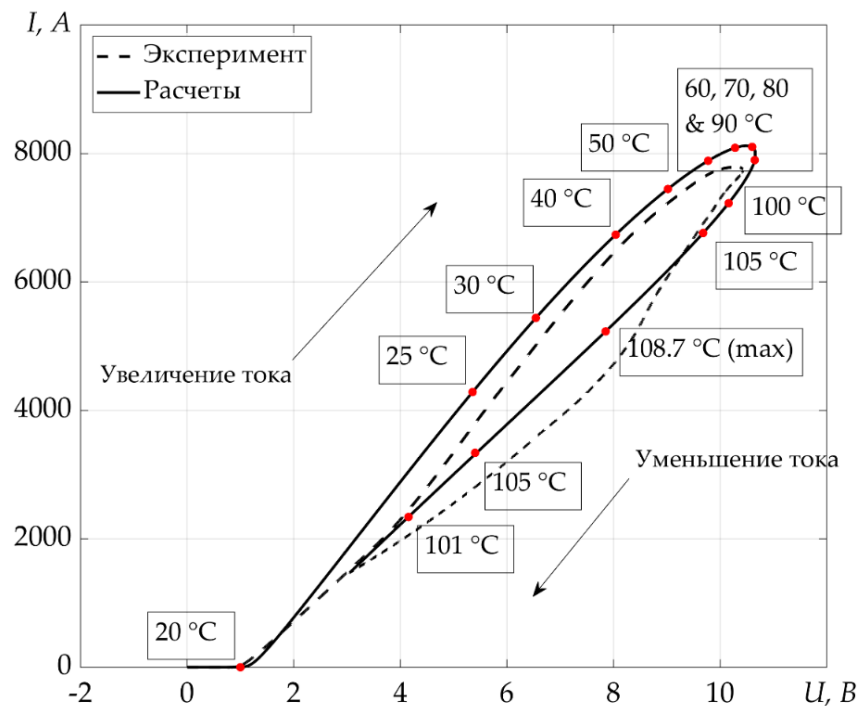


Рисунок 15 – Динамическая вольтамперная характеристика T243–400, полученная в результате пропуска импульса тока. Сплошная кривая – результаты расчета. Пунктирная кривая – результаты эксперимента

Исходя из сходства динамических ВАХ на Рисунке 15 можно сделать выводы о достаточно высокой степени достоверности модели ВАХ и рассчитанных тепловых параметров.

Целями второго опыта являлись доказательство способности эффективного токоограничения разработанной схемы и верификация ранее полученной математической модели работы ТООУ. Для этого было сделано несколько шагов. Во-первых, была увеличена ёмкость конденсаторной батареи (КБ ИУ (конденсаторная батарея импульсной установки) на Рисунке 16, а) до 12,5 мФ для получения более мощного импульса тока. Во-вторых, собран сам прототип ТООУ (на Рисунке 16, б и в), который, в рамках эксперимента, ограничивал ток КЗ упомянутой КБ ИУ. На Рисунке 17 показана схема замещения собранного экспериментального стенда. На рисунке фигурируют следующие обозначения: ДТ – датчик тока; КППТ – контур поддержания тока; КБИК – конденсаторная батарея контура искусственной коммутации; ИПСИ – источник питания системы управления; СУ – система управления.

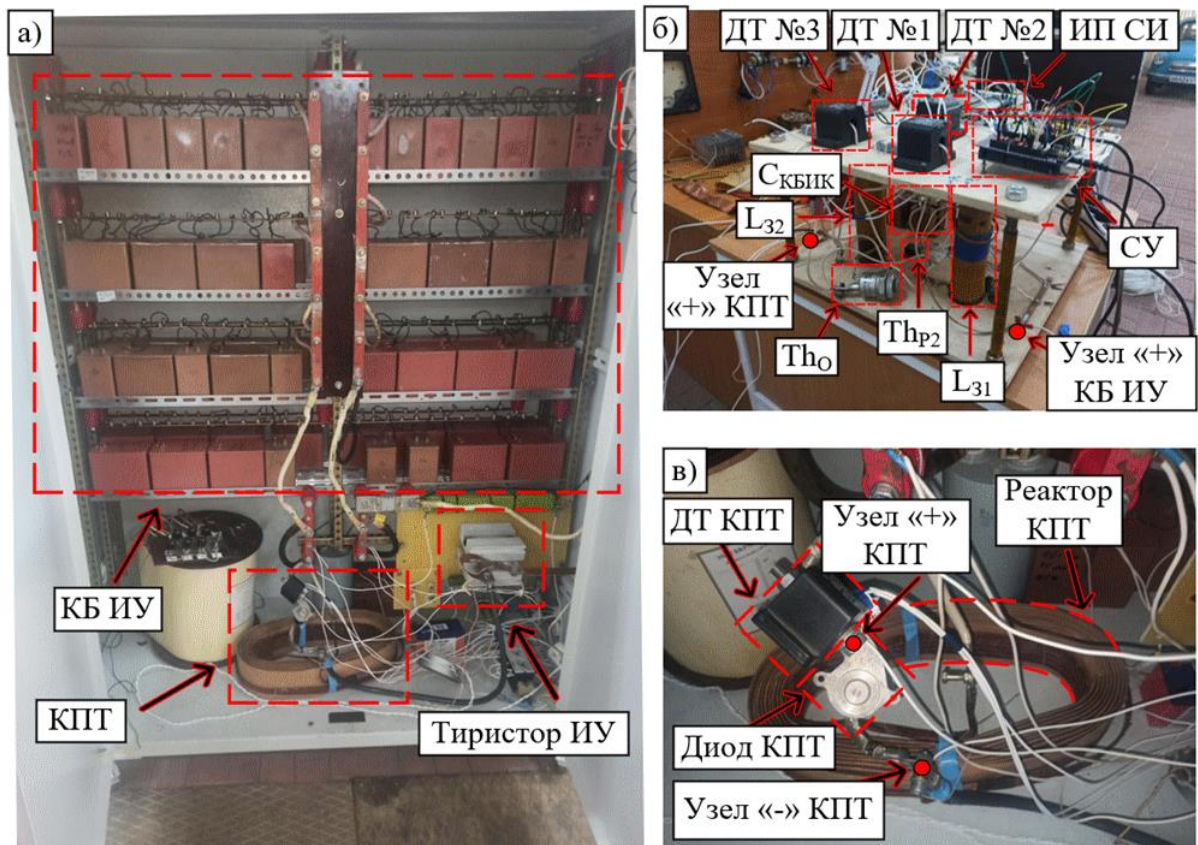


Рисунок 16– Внешний вид стенда для второго эксперимента: а) Фотография №1; б) Фотография №2; в) Фотография №3

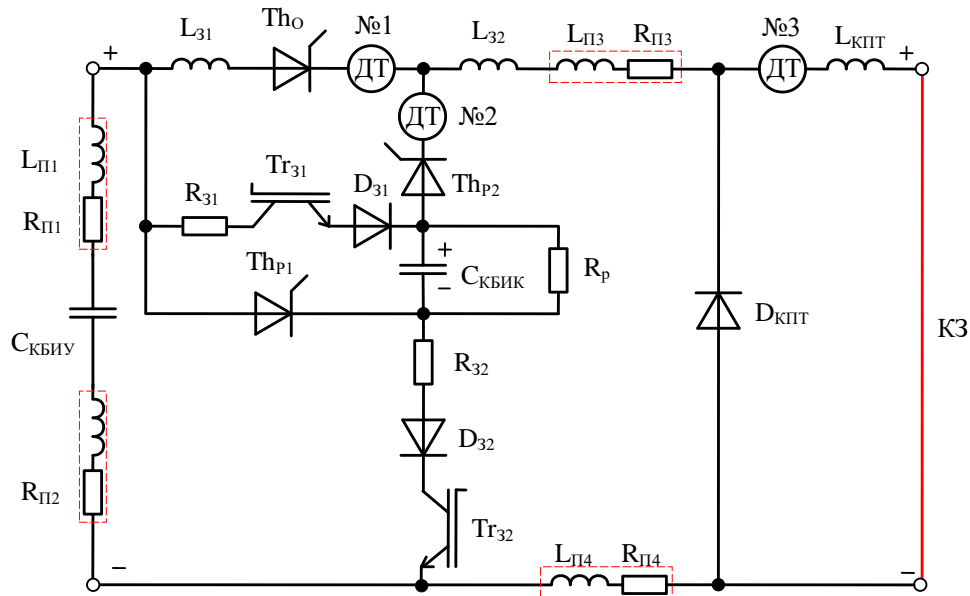


Рисунок 17 – Электрическая схема экспериментальной установки

Напряжение предварительного заряда КБ ИУ варьировалась в пределах 300-600 В. Также в ходе опытов менялась частота работы ТООУ в пределах 30–80 Гц. Для компьютерной модели по схеме на Рисунке 17 также была учтена нелинейность ВАХ ПП устройств и динамическое изменение активного сопротивления и индуктивности реактора контура поддержания тока из-за скин-эффекта и эффекта близости. Среднее отклонение полученных из компьютерной модели результатов относительно экспериментальных данных для различных конфигураций управления ПП ТООУ составило [напряжения разряда КБ ИУ, частота работы ТООУ, отклонение]: 606 В, 81 Гц, 3,09%; 502 В, 36 Гц, 3,53%; 405 В, 36 Гц, 4,88%; 302 В, 36 Гц, 4,52%; 502 В, 81 Гц, 3,95%; 402 В, 81 Гц, 3,89%; 301 В, 81 Гц, 10,09%; 502 В, 49 Гц, 3,18%; 405 В, 49 Гц, 4,78%; 306 В, 49 Гц, 5,46%. В качестве примера на Рисунке 18 показано сравнение компьютерной модели и эксперимента для конфигурации $U = 606$ В, $F = 81$ Гц.

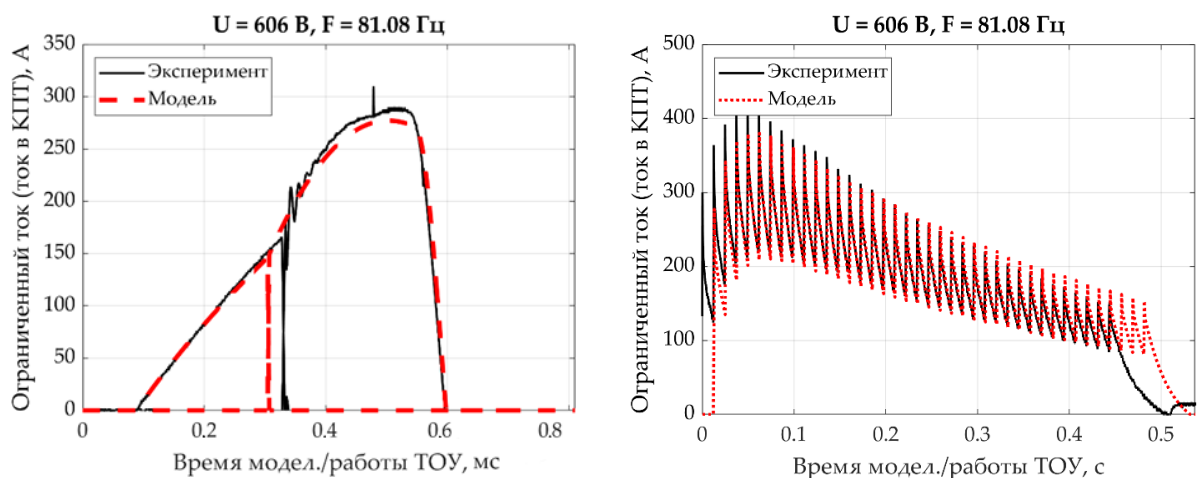


Рисунок 18 – Сравнение результатов экспериментов и модели ($U = 606$ В, $f = 81,08$ Гц). а) искусственная коммутация; б) Ток на выходе ТООУ

На Рисунке 19 для демонстрации эффективности токоограничения приведены численные значения максимального тока (I_{\max}) и интеграла Джоуля (IJ).

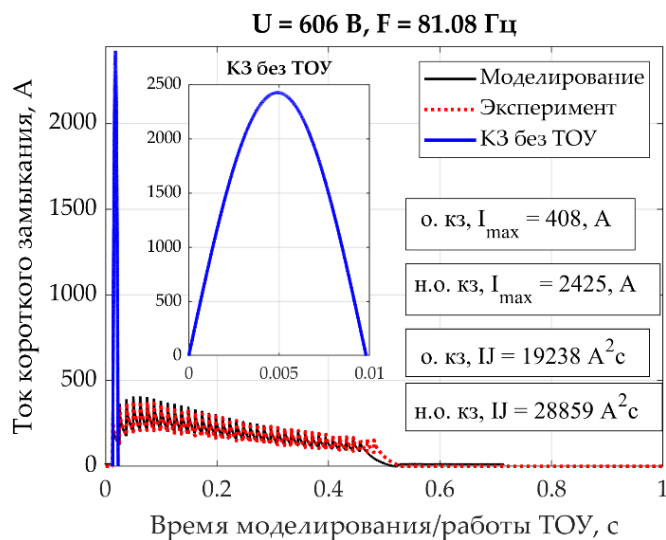


Рисунок 19 – Работа управляемого ТОУ («о. кз» и «н.о. кз» – ограниченное и неограниченное короткое замыкание соответственно)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена научно-техническая задача обоснования и разработки нового полупроводникового токоограничивающего устройства, способного длительно управляемо ограничивать токи короткого замыкания в автономных системах постоянного тока.

В ходе исследования были достигнуты следующие основные результаты:

1. Обоснована стратегия управляемого токоограничения как предпочтительный подход к защите автономных систем постоянного тока. Показано, что данная стратегия позволяет сохранить селективность работы автоматических выключателей и снизить тепловое и электродинамическое воздействие аварийного тока, тем самым предотвращая эскалацию повреждений.

2. Предложена новая схема полупроводникового токоограничивающего устройства, основанная на преобразователе постоянного тока с искусственной коммутацией, которая сочетает высокую эффективность ограничения, низкие потери в нормальном режиме и приемлемые массогабаритные показатели.

3. Разработана математическая модель предложенной схемы, на основе которой получены аналитические соотношения, связывающие электрические параметры устройства с требуемыми характеристиками аварийного режима (уровень ограниченного тока, его пульсации, длительность ограничения). На этой основе предложена методика последовательного расчёта параметров режима работы токоограничивающего устройства и параметров элементов, входящих в состав его схемы.

2. Создана динамическая тепловая модель полупроводниковых устройств, учитывающая зависимость формы вольт-амперной характеристики от теплового состояния силовых полупроводниковых устройств в переходных режимах. Модель интегрирована с тепловой схемой замещения, построенной по методу электротепловой аналогии, что позволило повысить точность расчёта теплового состояния при длительных токовых перегрузках.

3. Экспериментально подтверждена работоспособность предложенного токоограничивающего устройства и достоверность разработанных моделей. Первый цикл опытов верифицировал тепловую модель полупроводниковых приборов, второй — подтвердил способность устройства эффективно ограничивать аварийный ток и обеспечивать соответствие расчётных и экспериментальных данных в широком диапазоне напряжений (301–606 В) и частот управления (36–81 Гц). Среднее отклонение между моделью и экспериментом не превысило 5,5%, за исключением граничного режима (10,09%), что свидетельствует о высокой адекватности модели. Максимальное значение тока КЗ было уменьшено в 6–7,5 раз (наиболее глубокое ограничение составило с 2425 А до 408 А). Тепловой импульс КЗ (интеграл джоуля) был уменьшен в 1.5–2.3 раза (в наиболее тяжелом случае с 28859 А²·с до 19238 А²·с).

Таким образом, в диссертационной работе предложен и экспериментально обоснован новый подход к защите автономных систем постоянного тока, основанный на управляемом токоограничении на базе полупроводникового преобразователя. Полученные теоретические и экспериментальные результаты вносят вклад в развитие средств защиты в судовых и иных автономных системах, открывают возможности для повышения селективности, устойчивости и живучести современных электротехнических комплексов.

Разработанные модели, методики расчёта и схемно-технические решения могут быть использованы при проектировании и модернизации систем электроснабжения транспортных средств, энергоустановок с накопителями, микросетей и других автономных объектов, где критически важны надёжность и безопасность при аварийных режимах.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, приравняемые к публикациям в журналах Перечня ВАК с присвоением категории К1:

1. Safonov E. P. et al. A Semiconductor Current-Limiting Device Based on a DC Converter //Energies. – 2024. – Т. 18. – №. 1. – С. 58(журнал *Energies* – Q2).
2. Safonov E. et al. On the Problems of Current Limitations in Networks Based on Power Semiconductor Devices //Energies. – 2023. – Т. 16. – №. 16. – С. 5905(журнал *Energies* – Q2).

Работы, приравняемые к публикациям в журналах Перечня ВАК с присвоением категории К3:

3. Vostrov K., Frolov V., Safonov E. Development of current limiting device for short and autonomous networks //Plasma Physics and Technology. – 2017. – Т. 4. – №. 2. – С. 182-185 (журнал *Plasma Physics and Technology*–Q4).

Статьи в сборниках трудов конференции:

4. Safonov E. P., Frolov V. Y., Paramonov E. D. Semiconductor diode model with thermal behavior for a DC current limiting device //2023 Seminar on Electrical Engineering, Automation & Control Systems, Theory and Practical Applications (EEACS). – IEEE, 2023. – С. 267-270.

5. Safonov E., Lozinova N. Influence of excess eddy current core losses of saturable reactor on the process of semiconductor valve turn-on //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 643. – №. 1. – С. 012080.

Работы, опубликованные в системе РИНЦ:

6. Сафонов Е. П., Дайновский Р. А., Лозинова Н. Г. Расчет параметров демпфирующих гс-цепей преобразователя с учетом обратного тока тиристора //Научно-технические ведомости Севмашвтуза. – 2019. – №. 2. – С. 11-17.

7. Сафонов Е. П., Востров К. И., Фролов В. Я. Разработка токоограничивающего устройства резонансного типа на основе кабельного трансформатора //Неделя Науки СПбПУ. – 2017. – С. 139-142.

8. Востров К. И., Сафонов Е. П., Фролов В. Я. Физическое моделирование токоограничивающего устройства резонансного типа //Неделя Науки СПбПУ. – 2017. – С. 143-145.

Получен патент на полезную модель:

9. Патент №226244, Российская Федерация, МПК H02H 9/02 (2006.01). Полупроводниковое токоограничивающее устройство для сетей постоянного тока: №2023135527: заявл. 27.12.2023 опубл. 28.05.2024 / Сафонов Е.П., Фролов В.Я.; заявитель ФГАОУ ВО "СПбПУ".