

На правах рукописи

Сосков Анатолий Георгиевич

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОМПЛЕКТНЫХ УСТРОЙСТВ
(ТЕОРИЯ, РАЗРАБОТКА, ВНЕДРЕНИЕ)

Специальность 05.09.06 - Электрические аппараты

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

ХАРЬКОВ - 1994

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Харьковском институте инженеров городского хозяйства

Научный консультант - заслуженный деятель науки и техники Украины, доктор технических наук, профессор Намитоков Кемаль Кадырович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Власов Константин Петрович

- доктор технических наук
Дзюбан Виталий Серафимович

- доктор технических наук, профессор
Клепиков Владимир Борисович

Ведущее предприятие - Научно-производственное объединение
"Харьковский электромеханический завод"

Защита диссертации состоится "17" сентября 1994 г.
на заседании специализированного ученого совета Д 02.09.02
в Харьковском политехническом институте (310002, г. Харьков-2,
ГСП, ул. Фрунзе, 21).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского политехнического института.

**ЛНБ им. В. Стефаника
АН Украины**

Автореферат разослан " _____ " _____ 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого
совета

Батыгин К.В.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00756417 (U)

Актуальность. В связи с усложнением и интенсификацией производственных процессов, внедрением систем автоматического управления в промышленности, на транспорте и в других отраслях народного хозяйства существенно возросли требования к качеству электрических аппаратов, составляющих основу низковольтных комплектных устройств, предназначенных для приема, управления (регулирования) и распределения электрической энергии.

К числу основных показателей качества, определяющих ресурс электрических аппаратов, относятся механическая и коммутационная (электрическая) износостойкости. Наибольшие значения этих параметров, характеризующие лучшие из существующих электромагнитных низковольтных аппаратов на номинальные токи от 100 до 630 А, составляют соответственно 20 млн. и 0,5 млн. циклов.

В условиях необходимости увеличения производительности оборудования и предельной интенсификации производственных процессов достигнутые уровни износостойкости (особенно электрической) являются недостаточными, поэтому возникает задача по их повышению. Применение таких традиционных для аппаратостроения направлений, как совершенствование кинематики, повышение эффективности систем дугогашения, применение новых контактных материалов уже не позволяют радикально улучшить существующее положение.

Поиски решения поставленной задачи привели к новым направлениям в разработке низковольтных электрических аппаратов, среди которых можно выделить следующие:

- создание вакуумных аппаратов;
- создание синхронных аппаратов;
- создание бесконтактных полупроводниковых аппаратов;
- создание гибридных полупроводниковых аппаратов.

В первых двух направлениях повышение износостойкости аппаратов обеспечивается за счет создания облегченных условий для гашения электрической дуги.

В настоящее время у нас в стране и за рубежом предпочтительное развитие получили последние два направления, что обусловлено высоким уровнем современных силовых полупроводниковых приборов, обладающих недостижимыми для контактных аппаратов быстродействием и низкой мощностью управления. Применение полупроводниковых ключей, выполненных на базе силовых полупровод-

никовых приборов, для коммутации электрических цепей позволяет не только существенно повысить износостойкость и быстродействие аппаратов, но и осуществлять более сложные процессы управления электрооборудованием, чем операции "включено-отключено", выполняемые контактными аппаратами.

Высокие технико-экономические показатели полупроводниковых аппаратов, гибкость их регулировочных и защитных характеристик, возможность сочетать в одном устройстве функции различных аппаратов, удобство их сопряжения с элементами автоматики и вычислительной техники, с одной стороны, и имеющие место значительные достижения в развитии электронной схемотехники и микропроцессорных устройств, с другой стороны, создают благоприятные условия для разработки на основе этих аппаратов автоматизированных низковольтных комплектных устройств, отвечающих высоким требованиям современного энергонасыщенного производства. Что в свою очередь создает условия для получения значительного экономического эффекта за счет оптимизации управления технологическими процессами.

Именно актуальной для народного хозяйства проблеме, связанной с созданием бесконтактных и гибридных полупроводниковых аппаратов, и посвящена реферируемая работа.

Целью работы является выбор направления разработки бесконтактных и гибридных полупроводниковых аппаратов, создание теоретических основ их проектирования, разработка принципиально новых технических решений по созданию полупроводниковых схем аппаратов, внедрение в производство серий полупроводниковых аппаратов (ПА) и автоматизированных низковольтных комплектных устройств (НКУ) на их основе, удовлетворяющих современным требованиям.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

проанализированы существующие способы и схемы бездуговой коммутации электрических цепей на основе разработанных критериев их оценки и выбрано направление разработки бесконтактных и гибридных ПА;

проведены комплексные исследования динамики электрических воздействий в полупроводниковых ключах (ПК), являющихся главной составляющей частью ПА, на основании этих исследований, а также с учетом обобщений и уточнений известных исследований разработаны методы расчета, позволяющие проектировать все типы

ПК в различных режимах их работы в составе ПА;

проведены теоретические и экспериментальные исследования нестационарного температурного поля силовых полупроводниковых приборов (СПП) с учетом специфического характера их токовой нагрузки, имеющей место в ПА, и на основе этих исследований разработаны методы расчета как температуры СПП, так и их циклоустойкости;

разработаны технические решения, позволяющие создавать ПА, отвечающие обремененным требованиям, а также предложены инженерные методы их расчета;

разработаны методы расчета ПА в составе автоматизированных НКУ с учетом их взаимодействия друг с другом, а также с нагрузкой и сетью;

определены технико-экономические характеристики разработанных ПА и автоматизированных НКУ на их основе, предложены пути их возможного совершенствования.

При решении этих задач применялись следующие методы исследования:

анализ электромагнитных коммутационных процессов, происходящих в силовых схемах ПА, представляющих нелинейные электрические цепи, проводился кусочно-припасовочным методом, основанным на разбиении процесса на отдельные интервалы коммутации. При этом СПП в схемах считались либо идеальными ключами, либо их вольт-амперные характеристики аппроксимировались известными аналитическими выражениями;

нестационарное температурное поле СПП исследовалось теоретически на основе 3^X -слойной модели с помощью интегрирования уравнений температурного поля в частных производных. При решении систем уравнений, характеризующих распределение температуры в структуре СПП, использовалось интегральное преобразование Лапласа. Переход от изображения к оригиналу производился на основании обратного преобразования Лапласа с применением теории вычетов;

при теоретическом исследовании физических процессов, происходящих в ПА, широко использовались ЭВМ. Основные методы расчета ПА представлены в виде программ для ЭВМ;

критерием истины служили экспериментальные исследования с последующей их обработкой методами теории вероятности и математической статистики, а также результаты опытно-промышленной эксплуатации ПА;

для экспериментальной проверки теоретических исследований температурного поля СШП автором был разработан стенд, позволяющий измерить температуру полупроводниковой структуры СШП при воздействии на него одиночных (до 10 кА) импульсов различной формы и изменяющейся длительности (в пределах от 0 до 10 мс).

Научная новизна состоит в том, что решены научные задачи, связанные с исследованием, разработкой и внедрением в производство ПА и автоматизированных ККУ, выполненных на их базе, отвечающих современным требованиям. На основе их решения предложены:

1. Основные принципы построения ПА и области рационального их применения.

2. Оригинальные методики расчета, разработанные в результате исследования динамики электрических воздействий в полупроводниковых клетках (ПК):

методика расчета параметров защитных КС-цепей тиристоров и коммутационных перенапряжений при работе ПК в реверсивных схемах с учетом зарядного уравнения тиристора;

методика расчета основных элементов схемы принудительной емкостной коммутации ПК постоянного тока с учетом использования заряда коммутирующего конденсатора в динамических характеристиках тиристоров;

методика расчета перенапряжений в ПК постоянного тока при наличии линейного ограничителя перенапряжений с учетом предвключенной индуктивности сети;

обобщенная методика расчета всех типов ПК с учетом их режимов работы в ПА (в том числе и аварийных), характера нагрузки и динамических характеристик СШП, определяющих процессы как включения СШП, так и их выключения.

3. Методы и средства теоретического и экспериментального исследования нестационарного температурного поля СШП в условиях специфической импульсной токовой нагрузки, свойственной их работе в ПА, для проведения которых автором впервые использованы и разработаны:

трехслойная расчетная модель СШП, позволяющая достаточно точно исследовать температурное поле СШП при работе в импульсном режиме;

аналитическое решение уравнений теплопроводности для сложной системы, состоящей из трех разных тел, находящихся в непосредственном тепловом контакте;

аналитическое выражение, с помощью которого определяется переходное тепловое сопротивление для любого типа СИП в диапазоне малых времен (до 10 мс);

методика расчета теплового режима СИП при работе как в импульсном режиме, так и при длительной токовой нагрузке;

методика определения циклоустойкости СИП, учитывающая случайный характер распределения превышения температуры полупроводниковой структуры СИП при их использовании в гибридных ПА переменного тока;

основные расчетные соотношения для определения параметров ПА (номинальный ток, номинальный рабочий ток, перегрузочная характеристика и т.д.).

4. Принципиально новые технические решения по созданию ПА и методики расчета основных элементов их электрических схем.

5. Методы расчета ПА в составе автоматизированных НКУ с учетом их взаимодействия друг с другом, а также с нагрузкой и сетью, заключающиеся в создании основ теории проектирования ПА.

Практическая ценность работы состоит в том, что проведенные автором объемные теоретические исследования с учетом обобщения результатов известных исследований позволили впервые создать теорию ПА, а разработанные оригинальные технические решения по созданию ПА и методы их расчета, правильность которых подтверждена экспериментальными исследованиями и положительным опытом эксплуатации ПА в промышленности, позволяют успешно проектировать ПА различных типов, а также создавать на их основе высоконадежные автоматизированные НКУ, в том числе:

предложенные методики расчета ПК коммутационных ПА использовались при разработке серий гибридных и бесконтактных полупроводниковых контакторов переменного и постоянного тока, а их универсальность и полнота позволяют использовать их также и при разработке устройств преобразовательной техники и автоматизированного электропривода;

предложенная методика прогнозирования циклоустойкости СИП использовалась при проектировании серий гибридных и полупроводниковых контакторов переменного и постоянного тока;

разработанные оригинальные технические решения по созданию контролируемых ПА (защищены 15 а.с.) и методики их расчета использовались при проектировании серий полупроводниковых расцепителей для автоматических выключателей и реле контроля качества электроэнергии;

разработанные оригинальные технические решения по созданию аппаратов управления и регулирования (защитены 20 а.с.) и методики их расчета использовались при проектировании серий гибридных и бесконтактных контакторов, регуляторов напряжения, а также при проектировании на их основе автоматизированных НКУ;

предложенное автором выполнение полупроводниковых схем для бездуговой коммутации контакторов в виде отдельного блока для каждого полюса аппарата позволяет обеспечивать бездуговую коммутацию уже установленных у потребителя обычных электромагнитных контакторов и пускателей, расширяя таким образом область и эффективность применения этих блоков;

представление конечных результатов исследований в виде графических зависимостей и программ для ЭВМ снижает трудоемкость проектирования ПА и позволяет применять прогрессивные методы их автоматизированного проектирования;

полученные результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке инженеров-электриков в ХПИХ и инженеров в области электроаппаратостроения в ХПИ, г. Харьков.

Внедрение результатов работы. Проведенные научные исследования явились основой для разработки и создания полупроводниковых расцепителей серии РП для автоматических выключателей АЗ700 переменного и постоянного тока; гибридных полупроводниковых контакторов переменного тока серий КТ64, КТП64, КТ65 и КТП65 и постоянного тока серии КПВ1; тиристорных блоков для бездуговой коммутации серий БК21 и БК51; бесконтактных контакторов переменного и постоянного тока, реле контроля качества электроэнергии типов РКТ, РКН и РКЧ и автоматизированных НКУ: системы регулируемого пуска асинхронных двигателей от источника ограниченной мощности, быстродействующего устройства автоматического включения резерва и тиристорного дискретного регулятора переменного напряжения.

Указанные разработки были выполнены под руководством и при непосредственном участии автора в период его работы в институтах ВНИИ Электроаппарат и ХПИХ. Экономический эффект от внедрения указанных выше ПА превышает 1 млн. руб. в год (в ценах 1989 г.) Соответствующие документы о внедрении представлены в приложении к диссертации.

Апробация работы. Достоверность основных теоретических результатов работы проверена экспериментально в условиях произ-

водства. Соответствие технических характеристик серий ПА техническим заданиям подтверждено заключениями и актами межведомственных комиссий.

Разделы работы докладывались на Всесоюзных конференциях:

I - "Новые бесконтактные электронные устройства", г. Москва, 1966;

III - "Новые бесконтактные электронные устройства", г. Москва, 1970;

I - "Повышение эффективности производства полупроводниковых приборов и преобразователей на базе новой техники", г. Москва, 1971;

III - "Состояние и перспективы развития низковольтного аппаратостроения", г. Тбилиси, 1979;

У - "Состояние и перспективы развития аппаратов низкого напряжения", г. Ульяновск, 1985;

УI - "Состояние и перспективы развития аппаратов низкого напряжения", г. Дивногорск, 1990.

Дубликации. Основное содержание работы освещено в 73 печатных работах, в том числе 2 монографиях, 34 авторских свидетельствах на изобретения и I патенте.

Автор защищает.

1. Разработанные критерии для анализа различных способов и схем бездуговой коммутации электрических цепей, выбранные пути реализации ПА и области их рационального использования.

2. Комплексный подход к исследованию динамики электрических воздействий в ПК, являющихся основой коммутационных ПА, впервые проведенный с учетом типа ПК и режима его работы, характера нагрузки и сети и динамических характеристик СШ.

3. Теоретические и методологические основы проектирования ПК как переменного, так и постоянного тока, в том числе разработанные с применением ЭВМ методики расчета их основных элементов.

4. Теоретические исследования нестационарного температурного поля СШ на основе впервые предложенной трехслойной симметричной модели СШ в условиях специфической токовой нагрузки на СШ, имеющей место в гибридных ПА, и разработанные методы расчета температуры структуры СШ и оценки их циклоустойкости в указанном режиме.

5. Метод и средства для экспериментального определения температуры структуры СШ при воздействии на него сильно-точных кратковременных импульсов произвольной формы.

6. Разработанные оригинальные технические решения по созданию ПА различных типов и методы расчета их основных узлов.

7. Принципы построения автоматизированных НКУ на основе ПА и методы расчета, позволяющие учесть взаимодействие ПА друг с другом, с сетью и нагрузкой.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (210 наименований) и приложения.

Диссертация содержит 300 страниц основного машинописного текста, 125 рисунков и 30 таблиц.

Основное содержание работы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и дана её общая характеристика.

В первой главе проведен выбор путей разработки полупроводниковых аппаратов и поставлены задачи исследования.

Динамичное развитие силовой электроники, имеющее место в последние десятилетия, с одной стороны, и наметавшийся кризис в традиционных способах улучшения качества контактных аппаратов, с другой стороны, привели к широкому применению элементов силовой электроники в низковольтном аппаратостроении.

В настоящее время четко определились следующие пути развития низковольтных аппаратов на основе элементов силовой электроники:

создание бесконтактных ПА;

создание гибридных ПА.

В результате критического рассмотрения указанных путей развития аппаратов было установлено, что наиболее эффективно использование ПА в тяжелых режимах работы, а также в регулируемом электроприводе. При этом было показано, что одной из перспективных областей применения ПА с расширенными функциональными возможностями является создание на их основе автоматизированных НКУ повышенной надежности.

На основании анализа способов и схем для бездуговой коммутации электрических цепей по разработанным критериям их оценки определены следующие основные принципы построения ПА:

1) полупроводниковую часть силовой схемы бесконтактных и гибридных ПА переменного тока целесообразно выполнять на базе полупроводниковых ключей с естественной коммутацией тиристором, входящих в их состав, а ПА постоянного тока — на базе полупроводниковых ключей с принудительной емкостной коммута-

цией основного тиристора. В связи со сложностью и невысокой надежностью последней её применение в цепях переменного тока может быть обосновано только при создании ЦА с высокими требованиями к быстродействию и уровню токоограничения при отключении тока К.З.;

2) схемы управления полупроводниковыми ключами ЦА предпочтительно строить на бесконтактном принципе с использованием для воздействия на управляющую цепь тиристоров либо их анодного напряжения, либо тока силовой цепи. При этом, эти схемы должны легко сочетаться с устройствами защиты, автоматики и элементами вычислительной техники.

Анализ работ известных ЦА по патентной и технической информации показал, что они по назначению, принципам построения, по режимам работы как собственно ЦА, так и силовых полупроводниковых приборов, входящих в их состав, существенно отличаются от устройств преобразовательной техники. Поэтому известные методы расчета преобразовательных устройств непосредственно непригодны для расчета ЦА и возникает необходимость в дополнительных исследованиях, позволяющих не только установить возможность выборочного использования некоторых существующих методов расчета при их соответствующей доработке, но и создать новые.

На основании указанного выше анализа были также определены и сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованиям динамики электрических воздействий в ЦК, проведенным на основе анализа переходных электромагнитных процессов, происходящих в различных режимах их работы в составе ЦА. ЦК, являющиеся основным элементом силовой части как бесконтактных, так и гибридных ЦА, позволяют включать или отключать нагрузку в цепях электрического тока, а также регулировать её мощность.

Автором предложено классифицировать ЦК по следующим признакам: способу бездуговой коммутации, роду тока, способу управления, числу фаз и схеме соединения.

ЦК переменного тока выполняются, как правило, на базе двух встречно-параллельно включенных тиристоров либо одного симистора, реже используется для этой же цели тиристор, шунтируемый в обратном направлении диодом (упрощенная схема).

ЦК постоянного тока выполняются также на базе силового тиристора со схемой принудительной емкостной коммутации.

В гибридных ПК наряду с полупроводниковой схемой используются механические контакты, позволяющие путем шунтирования полупроводниковой схемы существенно понизить потери энергии в установившемся режиме работы.

Проектирование ПК, целью которого является выбор типа ключа, а также типов основных силовых элементов, входящих в его состав, представляет достаточно трудоемкую задачу. Это обусловлено как сложностью электромагнитных процессов, происходящих в ПК, особенно в реверсивных схемах включения, при коммутации динамических нагрузок (отключение асинхронных двигателей), а также в аварийных режимах работы, так и отсутствием необходимых методов расчета. В этой связи исследование динамики электрических воздействий в элементах ПК приобретает первостепенное значение и занимает ведущее место в теории ПА.

Проведенные автором комплексные исследования электрических воздействий в ПК полупроводниковых аппаратов с учетом обобщения результатов известных исследований позволило впервые создать достаточно полную теорию ПК, а разработанные методы расчета, правильность которых подтверждена экспериментальными исследованиями и положительным опытом эксплуатации ПА в промышленности, позволяют успешно проектировать ПК не только для практически любого типа ПА, но и для других устройств силовой электроники. Представление конечных результатов исследований в виде графических зависимостей и программ для ЭВМ существенно снижает трудоемкость их проектирования.

В результате проведенных исследований были разработаны следующие оригинальные методики расчета:

методика расчета параметров защитных RC-цепей тиристорov и коммутационных перенапряжений при работе ПК в реверсивных схемах с учетом зарядного уравнения тиристора;

методика расчета основных элементов схемы принудительной емкостной коммутации ПК постоянного тока с учетом использования заряда коммутирующего конденсатора и динамических характеристик тиристорov;

методика расчета перенапряжений в ПК постоянного тока при наличии линейного ограничителя перенапряжений с учетом предвключенной индуктивности сети;

обобщенная методика расчета всех типов ПК переменного тока с учетом их режимов работы в ПА, в том числе и аварийных, характера нагрузки и динамических характеристик СШ, опреде-

лящих процессы как включения СИП, так и их выключения.

На основании обобщения известных исследований и соответствующей их доработки были разработаны методы расчета регулировочных характеристик, токовой нагрузки и потерь мощности СИП для всех типов ПК, а также получены аналитические выражения для определения восстанавливающегося напряжения на них при отключении нагрузки, в том числе и асинхронных двигателей, проведен расчет внешних перенапряжений.

С помощью разработанных методов расчета показано, что:

в трехфазных сетях коммутационные перенапряжения для ПК с упрощенной силовой схемой, примерно, на 20% выше, чем для ПК, в каждом полюсе которого установлено по два тиристора;

при неизменном $\cos \varphi_n$ с увеличением отключаемого тока $(\frac{dU}{dt})_{макс}$ возрастает, а $U_{макс}$ практически не меняется, поэтому для правильного выбора параметров защитной RC-цепи, необходимо $U_{макс}$ рассчитывать при номинальном токе, а $(\frac{dU}{dt})_{макс}$ - при предельных значениях отключаемого тока;

наибольшая величина перенапряжений, превышающая в несколько раз напряжение сети, имеет место при отключении последовательно RLC-контура (особенно при наличии в нем резонанса напряжения). Поэтому применять ПА в таких цепях не рекомендуется;

наиболее неблагоприятные условия для СИП имеют место при реверсивном включении ПК, поэтому этот режим является определяющим при проектировании ПК;

использование зарядного уравнения тиристора при анализе переходного режима восстанавливающегося напряжения дает возможность на качественно новом уровне оценить воздействие скорости нарастания напряжения на тиристоры при реверсивном включении ПК. Последнее особенно важно, так как позволяет применять в ПК недефицитные тиристоры с невысокими скоростями нарастания напряжения (до 100 В/мкс);

импульсная принудительная коммутация обладает преимуществами по сравнению с другими схемами по уровню использования заряда коммутирующего конденсатора. Предложенное дополнительное введение активного сопротивления в цепь обратного диода избавляет импульсную схему от свойственных ей недостатков и создает условия для её рационального использования в ПА постоянного тока, где потери энергии в контуре коммутации не являются определяющими;

из-за наличия предвключенной индуктивности уровень пере-

напряжений на коммутирующем конденсаторе ПК постоянного тока может значительно превосходить напряжение сети, в этом случае наиболее эффективным способом его ограничения является применение линейного ограничителя перенапряжений;

токовая нагрузка гибридных ПК переменного тока носит импульсный циклический характер, подчиняющийся вероятностным законам. Специфический характер токовой нагрузки на СШ этих ключей, а также гибридных ПК постоянного тока и бесконтактных переменного тока в режиме отключения аварийных токов не позволяет воспользоваться традиционными методами определения температуры СШ. В связи с этим возникает необходимость в дополнительных исследованиях температурного поля СШ при указанном характере токовой нагрузки.

В третьей главе проведены исследования и расчет тепловых режимов силовых полупроводниковых приборов в ПА.

Тепловой режим СШ является главным фактором, определяющим надежность ПА. Основным параметром, характеризующим тепловой режим СШ, является температура его полупроводниковой структуры, зависящая от характера подводимой к прибору мощности и его конструкции. Поэтому расчет значений этой температуры при заданных условиях работы является одной из важнейших задач, возникающих при разработке и проектировании ПА. Расчет температурного режима СШ, используемых в ПА, заметно усложняется вследствие специфичной формы импульсов мощности, рассеиваемой в полупроводниковой структуре, и нестационарного характера протекающих в СШ теплофизических процессов.

Показано, что наиболее приемлемым методом расчета температурного режима СШ в схемах ПА при импульсной нагрузке является аналитический, основанный на непосредственном решении уравнений теплопроводности для упрощенной тепловой модели.

Известна двухслойная симметричная модель выпрямительного элемента СШ. Однако, в связи с тем, что в ней не учитывается слой припоя между кремнием и вольфрамом, толщина которого соизмерима с толщиной кремния, а теплопроводность его значительно ниже, чем у кремния и вольфрама, эта модель не отражает действительную картину температурного поля СШ в импульсном режиме.

Указанного недостатка лишена предложенная автором трехслойная симметричная модель СШ, в которой сохранены все детали выпрямительного элемента. Основным элементом модели явля-

ется тонкая кремниевая пластина, находящаяся с обеих сторон в плотном тепловом контакте через слой припоя с бесконечно протяжной средой вольфрамовых термокомпенсаторов.

Справедливость применения такой расчетной модели подтверждается тем, что при длительности импульса тока 10 мс уже при толщине термокомпенсатора 1 мм погрешность в расчете температуры, вносимая данным допущением, не превышает 1%. У мощных тиристоров (диодов) толщина вольфрамового термокомпенсатора превышает 1 мм, кроме того он находится в плотном тепловом контакте с медными выводами прибора.

Решение уравнения теплопроводности для принятой расчетной модели проведено при следующих допущениях, правомерность которых обоснована в работе:

тепловой поток распространяется только вдоль модели, т.е. задача решается в одномерном приближении;

выделение тепла при прохождении тока происходит равномерно по объему полупроводниковой структуры;

распределение тепла в модели симметрично;

теплофизические параметры материалов не зависят от температуры;

в паузу между импульсами тока полупроводниковая структура тиристора успевает охладиться до температуры окружающей среды;

вольт-амперная характеристика тиристора в прямом направлении аппроксимируется пороговым напряжением U_0 и линейной зависимостью напряжения от тока при $u > U_0$, определяемой дифференциальным сопротивлением R_D .

Распределение температуры в расчетной модели тиристора определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} + \frac{q}{C_1 \rho_1}, \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial \theta_3}{\partial t} = \alpha_3 \frac{\partial^2 \theta_3}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (I)$$

где переменные и параметры с индексом 1 — для кремниевой пластины, с индексом 2 — для припоя и с индексом 3 — для вольфрама;

θ — превышение температуры;

$\alpha = \frac{\lambda}{\delta}$ - коэффициент температуропроводности;

ρ - плотность; C - удельная теплоемкость;

$q = \frac{P}{V}$ - коэффициент теплопроводности;
 $q = \frac{P}{V}$ - удельная мощность, выделяемая в кремниевой пластине (полупроводниковой структуре).

Граничные и начальные условия для (I):

$$1) x=0, \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = 0; \quad 2) x=l_1, \quad \begin{cases} \theta_1 = \theta_2, \\ -\lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x}; \end{cases}$$

$$3) x=l_2, \quad \begin{cases} \theta_2 = \theta_3 \\ -\lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial x}; \end{cases} \quad 4) x \rightarrow \infty, \quad \theta_3 = 0;$$

при $t=0 \quad \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$.

При решении (I) использовано интегральное преобразование Лапласа. Переход от изображения к оригиналам произведен на основании обратного преобразования Лапласа с применением теории вычетов. В результате получено следующее выражение для превышения температуры полупроводниковой структуры СИИ при воздействии импульсов мощности произвольной формы:

$$\theta_1(x, t) = \kappa \int_0^t f_1(t-\tau) \cdot f_2(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $\kappa = \frac{2K_1 K_2}{K_1 C_1 \sqrt{a_1}}$; $K_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}$; $K_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \sqrt{\frac{a_3}{a_2}}$;

$$f_1(t-\tau) = i_T(t-\tau) [U_0 + i_T(t-\tau) R_T],$$

i_T - ток в СИИ,

$$f_2(\tau) = \int_0^\infty \frac{\sin A_1 u \cdot \cos(A_2 \frac{x}{l_1}) \cdot u e^{-u^2 \tau}}{u(A_0^2 + B_0^2)} du;$$

$$A_0 = \cos P_1 u \cdot \cos P_2 u - K_1 \sin P_1 u \cdot \sin P_2 u;$$

$$B_0 = K_1 K_2 \sin P_1 u \cdot \cos P_2 u + K_2 \sin P_2 u \cdot \cos P_1 u;$$

$$P_1 = \frac{l_1}{\sqrt{a_1}}; \quad P_2 = \frac{l_2 - l_1}{\sqrt{a_2}}; \quad 0 < t < t_u,$$

t_u - длительность импульса тока.

Максимальное значение θ_1 имеет место при $x=0$.

Ниже приведены выражения для определения превышения температуры полупроводниковой структуры тиристора при воздействии импульсов тока, наиболее распространенных в ПА:

а) импульс тока синусоидальный, $i_T = I_m \sin(\omega t + \varphi)$

$$\theta_1(x, t) = \kappa I_m \int_0^t \left\{ U_0 \sin[\omega(t-\tau) + \varphi] + I_m R_g \sin^2[\omega(t-\tau) + \varphi] \right\} f_2(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где I_m - амплитуда тока;
 φ - начальная фаза тока.

Решение (I) при воздействии импульсов тока, соответствующих трехфазному режиму работы гибридных ПК переменного тока, будет состоять из нескольких выражений типа (3).

б) импульс тока экспоненциальный, $i_T = I_0 e^{-\frac{t}{T_1}}$

$$\theta_1(x, t) = \kappa I_0 \int_0^t \left[U_0 e^{-\frac{t-\tau}{T_1}} + I_0 R_g e^{-\frac{2(t-\tau)}{T_1}} \right] f_2(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где T_1 - постоянная времени электрической цепи.

в) импульс тока с синусоидальной и экспоненциальной составляющими (отключение тока К.З.)

$$i_T = I_m \left[\sin(\omega t - \varphi_k) + e^{-\frac{t}{T_k}} \sin \varphi_k \right]$$

$$\theta_1(x, t) = \kappa I_m \int_0^t \left\{ \sin[\omega(t-\tau) - \varphi_k] + e^{-\frac{t-\tau}{T_k}} \sin \varphi_k \right\} \times$$

$$\times \left\{ U_0 + I_m R_g \left[\sin[\omega(t-\tau) - \varphi_k] + e^{-\frac{t-\tau}{T_k}} \right] \right\} f_2(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где T_k - постоянная времени цепи К.З.

$$0 < t < t_1,$$

а t_1 определяется из следующего трансцендентного уравнения

$$\sin(\omega t_1 - \varphi_k) + e^{-\frac{t_1}{T_k}} \sin \varphi_k = 0;$$

г) импульс тока прямоугольный, $i_T = I_n$

$$\theta_1(x, t) = \kappa I_n \int_0^t (U_0 + I_n R_g) f_2(\tau) d\tau, \quad (6)$$

$$0 < t < t_n,$$

где I_n - величина тока в импульсе.

Как нетрудно показать, выражение $\kappa \int_0^t f_2(\tau) d\tau$ представляет собой переходное тепловое сопротивление СПИ.

Таким образом, полученные аналитические выражения позволяют определить превышение температуры полупроводниковой структуры СПИ при любой форме токового импульса, заданной аналитически.

Основными параметрами, характеризующими температурный режим СПИ при прохождении импульса нагрузки, являются макси-

мальная температура структуры T_M и температура структуры в конце импульса T_K . Первый параметр определяет срок службы СШ в импульсном режиме работы (цикlostойкость), а второй - их перегрузочную способность. Полученные выше аналитические выражения позволяют определить эти параметры, однако, из-за своей сложности эти выражения малоприменимы для практического использования.

Чтобы произвести необходимые упрощения, представим выражение (3) в следующем виде:

$$\theta_i(x, t) = \kappa I_m U_0 Y_1(x, t) + \kappa I_m^2 R_g Y_2(x, t), \quad (7)$$

где

$$Y_1(x, t) = \int_0^t \sin[\omega(t-\tau) + \varphi] \int_0^\infty \frac{\sin A u \cos(A \frac{x}{l_1} u) e^{-u^2 \tau}}{u(A_0^2 + B_0^2)} du d\tau;$$

$$Y_2(x, t) = \int_0^t \sin^2[\omega(t-\tau) + \varphi] \int_0^\infty \frac{\sin A u \cos(A \frac{x}{l_1} u) e^{-u^2 \tau}}{u(A_0^2 + B_0^2)} du d\tau.$$

Такая форма записи более удобна для оценки влияния основных параметров прибора на температуру его полупроводниковой структуры.

Зависимость превышения температуры структуры от $I_m, U_0,$

R_g и κ явно выражена, а для определения влияния на температуру структуры геометрических размеров выпрямительного элемента СШ (l_1 и $\Delta = l_2 - l_1$) и угла включения φ на ЗЕМ были рассчитаны значения интегралов Y_1 и Y_2 при различных значениях этих параметров для $f = 50$ Гц.

Поскольку практически достаточно знать максимальное значение превышения температуры θ_m и превышение температуры в конце импульса тока θ_k , то используя значения интегралов Y_1 и Y_2 для моментов времени, соответствующих указанным превышениям температуры, выражения для θ_m и θ_k можно представить в виде:

$$\theta_m = \kappa I_m U_0 Y_{1m} + \kappa I_m^2 R_g Y_{2m}, \quad (8)$$

$$\theta_k = \kappa I_m U_0 Y_{1k} + \kappa I_m^2 R_g Y_{2k}. \quad (9)$$

Для удобства вычисления превышения температуры основные из результатов расчетов, проведенных на ЗЕМ (т.е. значения интегралов Y_1 и Y_2 , необходимые для расчета θ_m и θ_k), представлены в виде таблиц. Табличная форма при многообразии вариантов

схем и видов зависимостей несомненно более точна и рациональна по сравнению с графическими зависимостями.

Таким образом, подставляя в выражения (8) и (9) значения T_{1m} и T_{2m} или T_{1k} и T_{2k} , выбранные по таблицам для конкретного тиристора (диода) в соответствии с применяемой схемой ПК, и зная температуру окружающей среды, можно определить максимальную температуру структуры T_m и температуру её в конце импульса нагрузки T_k .

В результате проведенного в работе анализа основных зависимостей для превышения температуры структуры СПИ установлено: изменение температуры по толщине полупроводниковой структуры в процессе импульсной нагрузки незначительно, поэтому при определении температуры структуры достаточно ограничиться только выражением для превышения температуры в центре кремниевой пластины;

температура структуры зависит от теплофизических параметров СПИ, толщины припоя между кремнием и вольфрамом и не зависит от изменения толщины структуры в пределах её технологического допуска;

трехслойная модель тиристора по сравнению с известной двухслойной моделью позволяет более точно определять температуру тиристора в импульсном режиме работы. Так, превышение температуры структуры тиристора, рассчитанное на основе трехслойной модели, превышает на 30% значение температуры, полученное для двухслойной расчетной модели.

Применяя известные методы интерполирования для обработки результатов расчета, получили приближенные аналитические зависимости для $T_m(\varphi)$, $T_{2m}(\varphi)$, $T_{1k}(\varphi)$, $T_{2k}(\varphi)$ в однофазном режиме работы ПК.

Разработана также упрощенная методика для расчета температуры тиристорov в схемах ПК постоянного тока. Получены зависимости для переходного теплового сопротивления существующих типов тиристорov в диапазоне времен до 10 мс.

Для оценки точности предложенной методики расчета проведено экспериментальное определение температур структуры тиристорov. С этой целью была отобрана партия тиристорov типа Т-160 в количестве 103 шт. Исследования проводились на разработанной автором установке, которая, в отличие от известных, позволяла измерять температуру не только в конце импульса тока, но и в любой момент времени от начала импульса.

На основании статистической обработки результатов измерений, было установлено, что превышение температуры структуры тиристоров θ подчиняется нормальному закону распределения, а плотность распределения θ может быть найдена из выражения:

$$f(\theta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\theta-m)^2}{2\sigma^2}},$$

где σ - среднее квадратическое отклонение;

m - математическое ожидание этой величины;

$\sigma = 0,235 m$ - для тиристоров типа Т-160.

Произведена проверка совпадения экспериментально полученной зависимости с нормальным законом распределения согласно критерию Пирсона (χ^2 - квадрат), которая показала хорошую сходимость экспериментальной зависимости с теоретической.

При оценке точности предложенной методики расчета превышения температуры структуры тиристоров сравниваются средние значения температур ($\bar{\theta}$), как наиболее обобщающие поведение случайной величины (в нашем случае θ).

Для определения $\bar{\theta}_M$ и $\bar{\theta}_K$ использованы выражения (8) и (9). Установлено, что различие между расчетными и экспериментальными данными для указанных значений температуры не превышает 10%, что вполне удовлетворительно.

Сравнение верхней и нижней границ разброса θ_K при $I_M = 1670$ А, полученных экспериментально и расчетным путем (с учетом возможного разброса U_0 , R_g и Δ) также показало хорошее совпадение результатов.

При разработке методики определения циклоустойкости тиристор в схемах ПК использована известная зависимость средней циклоустойкости тиристора $N_{цсп}$ от величины перепада температуры перехода в процессе циклической нагрузки. Путем соответствующих преобразований было получено выражение для оценки средней циклоустойкости тиристор, работающих в гибридных ПК переменного тока:

$$N_{цсп} = \frac{\pi A}{\mu V} \cdot \frac{1}{\int_0^{\pi} \theta_m^2(\varphi) d\varphi}, \quad (10)$$

где

A, μ, ν, B - коэффициенты, учитывающие конструктивные особенности тиристора;

$\theta_m(\varphi) = \kappa I_M U_0 \gamma_{1m}(\varphi) + \kappa I_M^2 R_g \gamma_{2m}(\varphi)$ - зависимость превышения температуры от угла φ при заданном токе.

Зависимости интегралов $\gamma_{1m}(\varphi)$ и $\gamma_{2m}(\varphi)$ для различных типов тиристор заданы таблично.

Показано, что расчет циклоустойкости целесообразно проводить для средних значений превышения температуры $\bar{\theta}_M$, т.е. для тех, которые имеют место при $R_{дер}$, $U_{дер}$ и $\Delta_{сер}$.

С целью упрощения расчета циклоустойкости тиристорных автоматов предложена следующая эмпирическая зависимость:

$$N_{цср} = \beta N(\theta), \quad (II)$$

где β — эмпирический коэффициент, значение которого для тиристора Т-160 равно 3,27;

$N(\theta)$ — циклоустойкость тиристорных при $\psi = 0$.

Получено выражение, позволяющее определять значение эмпирического коэффициента для тиристора любого типа.

Относительная погрешность при вычислении $N_{цср}$ по формуле (II) по сравнению с (I) не превышает 10%.

На основании разработанной методики расчета циклоустойкости тиристорных автоматов, показано, что средняя циклоустойкость тиристорных автоматов в схеме ПА с двумя тиристорами, примерно, в 3 раза выше, чем в ПА с упрощенной схемой при неизменном коммутируемом токе.

Расчет циклоустойкости тиристорных автоматов в схеме гибридных ПА постоянного тока приводится по формуле (I) при $\theta_{M1} = const$.

Предложенные выше методики использованы для расчета режимов токовой нагрузки тиристорных автоматов в схемах гибридных низковольтных контакторов, разрабатываемых институтом ВНИИ Электроаппарат и ОКБ НПО "КЭМЗ".

В результате анализа теплового режима СПИ при длительном воздействии токовой нагрузки в наиболее характерных режимах работы ПА получены основные расчетные соотношения для определения параметров аппаратов (номинальный ток, номинальный рабочий ток, перегрузочная характеристика и т.п.). При этом было показано, что одним из способов устранения недостатков, связанных с распределением токов между параллельно включенными тиристорами, выполненном на основе традиционных схемных решений, может быть режим их работы, в котором тиристоры одного направления включаются поочередно. Предложенное автором схемное решение поочередного включения тиристорных автоматов одного направления обеспечивает абсолютно равномерную загрузку параллельно включенных приборов по току. Разработанные программы расчета на ЭВМ указанных выше параметров ПА позволяют использовать методы автоматизированного проектирования при создании подобных изделий.

В четвертой главе рассмотрены принципы построения и методы расчета низковольтных ПА.

В результате проведенных в этой главе исследований были разработаны принципы построения, электрические принципиальные схемы, методы расчета, а также определены пути совершенствования следующих ПА:

унифицированных устройств контроля качества электрической энергии;

бесконтактных полупроводниковых контакторов (пускателей) переменного тока;

бесконтактных полупроводниковых контакторов постоянного тока;

гибридных полупроводниковых контакторов.

Разработанные унифицированные бесконтактные устройства контроля (БУК) качества электрической энергии относятся к группе контролируемых ПА и предназначены для выявления аварийных режимов по току, напряжению и частоте. Выполнение БУК в виде полупроводниковых реле защиты, состоящих из измерительных и логических элементов, позволяет использовать их как при создании комплектов систем защиты электрических сетей, так и включать в состав бесконтактных и контактных коммутационных аппаратов для контроля того или иного параметра электрической энергии.

Важнейшими измерительными элементами (ИЭ) являются измерительные элементы тока. Показано, что ИЭ переменного тока в низковольтных сетях целесообразно выполнять на базе трансформаторов тока (ТТ) с замкнутым магнитопроводом как наиболее надежным и технологическим элементом, позволяющим достаточно просто производить пропорциональное преобразование тока в первичной силовой цепи в выходное напряжение. При этом могут использоваться как стандартные измерительные ТТ, так и специальные ТТ с насыщенным магнитопроводом. Причем первые используются в тех случаях, когда есть независимый источник питания и нет жестких требований к массогабаритным показателям устройства, например, при их использовании в автоматизированных НКУ. При этом линейность зависимости $U=f(I)$ реализуется естественно. В тех же случаях, когда БУК необходимо встраивать в аппарат, например, в автоматический выключатель в качестве полупроводникового расцепителя, применяются ТТ с насыщенным магнитопроводом, позволяющие наряду с функциями ИЭ осуществлять функции питания. Такое использование ТТ в БУК дает последним

ряд ценных преимуществ: отпадает необходимость в независимом источнике питания, функционирование схемы БУК не зависит от величины напряжения защищаемой сети, резко возрастает устойчивость БУК к токам К.З.

Разработанная автором инженерная методика расчета таких ИЭ существенно снижает трудоемкость их проектирования.

Анализ широкого круга ИЭ постоянного тока показал, что наиболее простая конструкция ИЭ получается при использовании шунтов в сочетании либо с интегральным усилителем постоянного тока с двойным преобразованием входного сигнала, либо с магнитным усилителем. Первый вариант используется только в БУК, применяемых в ИКУ в виде отдельного блока, второй вариант ИЭ является более предпочтительным пристройке БУК в аппарат.

В результате разработки бесконтактных полупроводниковых контакторов (пускателей) переменного тока было создано несколько модификаций контакторов и разработаны общие методики их расчета, базирующиеся на методиках расчета, представленных в пп. 2 и 3.

Основным исполнением контактора является трехполусное исполнение с запуском тиристорной силовой цепи с помощью оптронных тиристорных и упрощенной схемой управления. Применение их наиболее эффективно в тяжелых условиях эксплуатации, которые характеризуются высокой частотой включения, большими значениями включаемых и отключаемых токов при низких $U_{\text{н}}$, наличием агрессивной среды, повышенной взрывоопасностью и т.п.

Существенно расширяется область применения полупроводниковых контакторов при введении в них ранее разработанных устройств защиты от аварийных режимов, а также систем импульсно-фазового управления. В этом случае они могут выполнять не только дополнительные функции автоматических выключателей, но и функции автоматизированных комплексов устройств, совмещая режимы управления, регулирования и защиты. Для повышения номинального тока аппарата применяются ИК с согласо-параллельно включенными и поочередно работающими тиристорами.

Разработанные бесконтактные контакторы постоянного тока целесообразно использовать в тех же условиях, что и контакторы переменного тока. При введении автоматического управления расширяются функциональные возможности аппарата, что позволяет использовать его, например, для безреостатного пуска двигателей постоянного тока.

Определены принципы построения полупроводниковых гибридных контакторов.

Показано, что в условиях острого дефицита коммутационной аппаратуры и конструкционных материалов целесообразно полупроводниковую схему для бездуговой коммутации выполнять в виде отдельного блока, что позволяет не только использовать в качестве базовой конструкции серийно выпускаемые электромагнитные контакторы без конструктивных изменений, но и обеспечить бездуговую коммутацию аппаратов, находящихся в эксплуатации.

Применение тиристорных блоков для бездуговой коммутации позволило повысить электрическую износостойкость существующих контакторов в 25 раз и более при работе их в тяжелых режимах.

В результате внедрения выполненных разработок было освоено производство и начат промышленный выпуск полупроводниковых расцепителей серии РП для автоматических выключателей АЗ700 переменного и постоянного тока; гибридных полупроводниковых контакторов переменного тока серий КТ64, КТП64, КТ65 и КТП65; гибридных полупроводниковых контакторов постоянного тока серии КП61; автоматизированных низковольтных комплектных устройств на основе бесконтактных и гибридных контакторов переменного и постоянного тока и полупроводниковых реле тока, напряжения и частоты.

Повышенная надежность выпускаемых ПА, а также современный уровень их технических характеристик обеспечены следующими факторами:

высоким уровнем принятых технических решений (при их разработке было использовано свыше 30 изобретений);

использованием методов и средств построения электронных и электрических схем (цифровое управление, интегральные микросхемы, комплектующие изделия с повышенным сроком службы и т.д.);

облегченными режимами работы элементов схем (например, схема принудительной коммутации в бесконтактных и гибридных контакторах постоянного тока находится в рабочем состоянии кратковременно только в момент отключения).

В пятой главе приведены результаты разработки и исследований автоматизированных НКУ на основе полупроводниковых аппаратов.

Показано, что при создании сложных автоматизированных НКУ на основе ПА возникает необходимость в дополнительных исследованиях, позволяющих учесть как взаимодействие между отдельными ПА, так и комплексное взаимодействие ПА, нагрузки и сети, со-

здать дополнительные устройства, обеспечивающие и учитывающие это взаимодействие и разработать необходимые методы расчета.

В результате проведенных исследований были разработаны принципиальные электрические схемы, методы расчета их основных узлов, проанализированы основные режимы работы и определены области применения следующих автоматизированных НКУ:

системы регулируемого пуска асинхронного двигателя от источника ограниченной мощности;

быстродействующего устройства автоматического включения резерва;

тиристорного дискретного регулятора (стабилизатора) переменного напряжения.

На основе выполненных разработок были созданы соответствующие автоматизированные НКУ, промышленное производство которых освоено в НПО "ХЭМЗ", г. Харьков.

Применение в системе регулируемого пуска асинхронного двигателя обратной связи по току статора дает возможность ограничить пусковой ток на заданном уровне, а следовательно, ограничить потребляемую мощность от источника питания, а также потери в асинхронном двигателе, выбрать тиристоры на меньший ток или управлять двигателем большей мощности и, наконец, исключить снижение напряжения питания ниже требуемого уровня. Показано, что схемное решение целесообразно применять при запуске асинхронного двигателя с вентиляторной нагрузкой или при неполной нагрузке в момент пуска, когда снижение пускового момента приводит только к некоторому возрастанию времени пуска двигателя.

Проведенные исследования пуска двигателей при различных уровнях ограничения пускового тока показали возможность надежного запуска этих двигателей с вентиляторной нагрузкой и кратностью пускового тока 2,5-3,0; экспериментальные исследования подтвердили правильность этих выводов.

Основными преимуществами разработанного НКУ для регулируемого пуска двигателя по сравнению с подобными являются малые потери мощности во включенном состоянии (в качестве силовой части используется гибридный управляемый ПК) и высокая надежность, обусловленная, с одной стороны, высокоточным цифровым способом построения систем управления и защиты и, с другой стороны, применением комплектующих с повышенным сроком службы, а также облегченным режимом их работы.

Разработанные быстродействующие устройства автоматического включения резерва (БУ АВР) являются автоматизированными НКУ, относящимися к системам гарантированного электроснабжения ответственных потребителей с повышенными требованиями ко времени перерыва питания.

Область применения БУ АВР — устройства ввода и распределения электрической энергии переменного тока напряжением 380 В, 660 В частотой 50 Гц, обеспечивающие питание крупных вычислительных центров и систем автоматического управления, сложного автоматизированного оборудования с непрерывным процессом производства, ответственных потребителей в атомной энергетике, нефтегазовой и химической промышленности.

Отличительной особенностью БУ АВР является то, что его силовая часть выполнена на базе тиристорной системы с естественной коммутацией, которая содержит промежуточную группу тиристоров, обеспечивающую принудительное запираание основных тиристоров через специально введенный добавочный токоограничивающий резистор. Наличие промежуточных тиристоров с добавочным резистором позволяет без выдержки времени переключаться с одного источника питания на другой, практически исключив при этом перерыв в питании нагрузки.

Высокие технико-энергетические показатели такой системы обеспечиваются кратковременной (20 мс) работой промежуточной группы тиристоров, а также возможностью определения аварийного состояния нагрузки при выключении БУ АВР, не сопровождающемся значительным токовым воздействием на элементы силовой части, сеть и нагрузку (первоначальное включение нагрузки производится через промежуточную группу тиристоров и добавочный резистор).

Схема управления БУ АВР выполнена на базе современных интегральных микросхем с повышенной помехоустойчивостью, использовано цифровое управление, обеспечивающее более высокий уровень надежности и точности работы устройства.

Все важнейшие блоки БУ АВР снабжены системами диагностики отказов основных элементов и узлов, что существенно повышает их эксплуатационные характеристики, причем система функциональной диагностики БУ АВР выполняет не только свое основное назначение, но и позволяет успешно решать задачи защиты и управления.

На основании проведенных аналитических исследований динамики электрических воздействий на элементы БУ АВР были разра-

ботаны методы и программы расчета на ЭВМ процесса переключения БУ АВР в различных режимах работы, в том числе и при К.З., и процесса воздействия БУ АВР на сеть при коммутационных процессах. При этом было установлено, что максимальное время переключения БУ АВР с источника на источник не превышает 12 мс, причем процесс переключения не сопровождается перерывом питания на нагрузке, а воздействия БУ АВР на сеть таковы, что не требуют установки дополнительных средств защиты.

В результате анализа различных вариантов выполнения регуляторов переменного тока показано, что в качестве базовой схемы регулятора (стабилизатора) целесообразно использовать тиристорный дискретный регулятор переменного напряжения (ТРД) с естественной коммутацией, вольтодобавочный трансформатор которого имеет ряд вторичных обмоток, числа витков которых относятся как 1:2:4:8:... Высокие энергетические показатели ТРД (высокий коэффициент мощности, отсутствие сглаживающих фильтров, высокий к.п.д.), возможность регулирования выходного напряжения в широком диапазоне без искажения его формы, высокий уровень быстродействия, удобство использования регулятора для стабилизации напряжения или тока создают преимущества в сравнении с традиционными регуляторами напряжения. Для указанного регулятора разработана цифровая система управления, удачно сочетающаяся с ЭВМ, и предложены методы расчета основных узлов устройства.

На примере создания регулятора с микропроцессорным управлением показано, что применение программируемых устройств управления (командоаппаратов) в ПА является технически удобным, экономически выгодным и существенно расширяет их область применения.

Заключение. В результате выполненных в работе исследований решена актуальная народно-хозяйственная задача по разработке теоретических основ проектирования и созданию серий бесконтактных и гибридных полупроводниковых аппаратов и автоматизированных низковольтных комплектных устройств на их основе.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы следующие.

I. Определены области наиболее рационального применения бесконтактных и гибридных полупроводниковых аппаратов на основе сравнительного анализа современных направлений повышения электрической износостойкости коммутационных аппаратов.

2. Установлено в результате опроса ведущих предприятий важнейших отраслей промышленности, что потребность в гибридных полупроводниковых аппаратах в настоящее время и в прогнозируемом будущем составляет порядка 10% от общего выпуска электромагнитных контакторов, а бесконтактных полупроводниковых аппаратов - (4-6)% от общего выпуска всех низковольтных аппаратов.

3. Выбрано направление разработки полупроводниковых аппаратов как результат анализа существующих способов и схем бездуговой коммутации электрических цепей.

4. Проведены комплексные исследования динамики электрических воздействий в ПК полупроводниковых аппаратов с учетом обобщения результатов известных исследований, позволяющие впервые создать достаточно полную теорию ПК, а разработанные методы расчета, правильность которых подтверждена экспериментальными исследованиями и положительным опытом эксплуатации ПА в промышленности, позволяют успешно проектировать ПК не только практически для любого типа ПА, но и для других устройств силовой электроники.

В результате исследований разработан ряд оригинальных методов расчета.

5. Проведены теоретические и экспериментальные исследования нестационарного температурного поля СПШ в условиях специфической импульсной токовой нагрузки, свойственной их работе в ПА, в процессе которых автором впервые использована более точная трехслойная модель СПШ, для которой получены аналитические решения уравнений теплопроводности и разработаны методики и средства расчета и экспериментальной проверки тепловых режимов СПШ, а также методы определения их циклоустойкости.

6. Разработаны принципы построения, электрические принципиальные схемы, методы расчета, а также определены пути совершенствования следующих ПА:

- 1) унифицированных устройств контроля качества электрической энергии;
- 2) бесконтактных полупроводниковых контакторов (пускателей) переменного тока;
- 3) бесконтактных полупроводниковых контакторов постоянного тока;
- 4) гибридных полупроводниковых контакторов.

Основные технические решения по указанным аппаратам защищены более чем 30 авторскими свидетельствами.

Представление конечных результатов исследований в виде графических зависимостей и программ для ЭВМ снижает трудоемкость проектирования ПА и позволяет применять методы автоматизированного проектирования.

7. Показано, что в условиях острого дефицита коммутационной аппаратуры и конструктивных материалов целесообразно полупроводниковую схему бездуговой коммутации гибридных контакторов выполнить в виде отдельного блока, что позволит не только использовать в качестве базовой конструкции серийно выпускаемые электромагнитные контакторы без конструктивных изменений, но и обеспечить бездуговую коммутацию аппаратов, находящихся в эксплуатации.

Применение тиристорных блоков для бездуговой коммутации позволило повысить электрическую износостойкость существующих контакторов в 25 раз и более при работе их в тяжелых режимах.

8. Разработаны принципиальные электрические схемы, проанализированы основные режимы работы и определены области применения следующих автоматизированных НКУ, выполненных на основе ПА:

- 1) системы регулируемого пуска асинхронного двигателя от источника ограниченной мощности;
- 2) быстродействующего устройства автоматического включения резерва (БУ АВР);
- 3) тиристорного дискретного регулятора (стабилизатора) переменного тока.

Предложены методы расчета ПА в составе автоматизированных НКУ с учетом их взаимодействия друг с другом, а также с нагрузкой и сетью.

9. Показано, что повышенная надежность разработанных ПА и НКУ на их базе, а также современный уровень их технических характеристик обеспечены следующими основными факторами:

высоким уровнем принятых технических решений (при их разработке были использованы 35 авторских свидетельств);

современными методами проектирования электронных и электрических схем, использующими прогрессивные цифровые способы управления, высоконадежные интегральные микросхемы, комплектующие с повышенным (до 87000 часов) сроком службы и т.д.;

облегченными режимами работы элементов схем (например, схема принудительной коммутации в бесконтактных и гибридных контакторах постоянного тока находится в рабочем состоянии

только в кратковременный момент отключения тока нагрузки, силовые тиристоры НКУ для пуска асинхронного двигателя в установленном режиме работы залунтированы контактами и т.п.).

10. Проведенные научные исследования явились основой для разработки и создания ряда серий ПА и автоматизированных НКУ. Перечень этих изделий приведен в общей характеристике работы.

Характер результатов диссертации. На взгляд автора полученные результаты можно квалифицировать как научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

Личный вклад. Основные результаты диссертации получены лично автором.

В 31 изобретении из 35, использованных при разработке новых технических решений по созданию ПА и выполненных в соавторстве, автором предложена идея и основные отличительные признаки изобретения.

И только в изобретениях /1,2,31,32/ автором предложены второстепенные отличительные признаки.

В монографии /36/, выпущенной в соавторстве, автором разработаны и описаны методы расчета измерительных элементов переменного тока, реле перегрузки, реле к.з. и реле времени, а также описан принцип работы разработанных расцепителей серии РП.

В опубликованных в соавторстве статьях и докладах автором предложены физические и расчетные модели, методы анализа и расчета, сформулированы задачи и выводы работы, выполнены основные аналитические преобразования. Тексты опубликованных работ также написаны лично автором.

Автор принимал непосредственное участие во всех экспериментах, приведенных в диссертационной работе.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. А.С. №160741 (СССР). Бесконтактное реле защиты автоматических выключателей от токов перегрузки /Могилевский Г.В., Мицкевич Г.Ф., Сосков А.Г. и др. - БИ, 1964, №5.

2. А.С. №163252 (СССР). Бесконтактное реле перегрузки /Мицкевич Г.Ф., Могилевский Г.В., Сосков А.Г. и др. - БИ, 1964, №12.

3. А.С. №208806 (СССР). Реле максимального тока для автоматических выключателей постоянного тока /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. - БИ, 1966, №14.

4. А.С. №218986 (СССР). Расцепитель максимального тока для автоматических выключателей переменного тока /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Смелянский И.И. и др. - БИ, 1968, №18.
5. А.С. №222502 (СССР). Реле времени для устройств максимальнотокковой защиты /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Смелянский И.И. и др. - БИ, 1968, №23.
6. А.С. №228762 (СССР). Выходной орган максимальных токовых расцепителей /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. и др. - БИ, 1968, №32.
7. А.С. №235161 (СССР). Полупроводниковое импульсное реле /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Смелянский И.И. и др. - БИ, 1969, №5.
8. А.С. №254629 (СССР). Одновибратор для реле времени /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. и др. - БИ, 1969, №32.
9. А.С. №254630 (СССР). Устройство для выходного каскада максимальной токовой защиты /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. и др. - БИ, 1969, №32.
10. А.С. №265288 (СССР). Реле времени /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. и др. - БИ, 1970, №11.
11. А.С. №266025 (СССР). Бесконтактное устройство максимально-токовой защиты /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. и др. - БИ, 1970, №11.
12. А.С. №266820 (СССР). Одновибратор /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. - БИ, 1970, №12.
13. А.С. №266953 (СССР). Транзисторное импульсное реле /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. - БИ, 1970, №12.
14. А.С. №285967 (СССР). Одновибратор /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. и др. - БИ, 1970, №34.
15. А.С. №302812 (СССР). Пороговое устройство /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. и др. - БИ, 1971, №15.
16. А.С. №335728 (СССР). Контактёр переменного тока с бездуговой коммутацией /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Колосимцев В.Д. - БИ, 1972, №13.
17. А.С. №508815 (СССР). Устройство для бездуговой коммутации цепей переменного тока /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Погорелов Ю.П. - БИ, 1976, №12.
18. А.С. №521611 (СССР). Контактёр постоянного тока с бездуговой коммутацией /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Бенсман В.Г. - БИ, 1976, №26.
19. А.С. №521612 (СССР). Контактёр постоянного тока с бездуговой коммутацией /Могилевский Г.В., Сосков А.Г.,

Бенсман В.Г. - БИ, 1976, №26.

20. А.С. №525175 (СССР). Контактор постоянного тока с бездуговой коммутацией /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Бенсман В.Г. и др. - БИ, 1976, №30.

21. А.С. №526029 (СССР). Контактор постоянного тока с бездуговой коммутацией /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Бенсман В.Г. и др. - БИ, 1976, №31.

22. А.С. №526963 (СССР). Контактор постоянного тока с бездуговой коммутацией /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Бенсман В.Г. и др. - БИ, 1976, №32.

23. А.С. №546029 (СССР). Устройство для бездуговой коммутации цепей постоянного тока /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Бенсман В.Г. - БИ, 1977, №5.

24. А.С. №550694 (СССР). Устройство для бездуговой коммутации цепей постоянного тока /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Погорелов Ю.П. и др. - БИ, 1977, №10.

25. А.С. №612296 (СССР). Бездуговой коммутационный аппарат /Матвиенко Ю.Ф., Сосков А.Г., Сокол А.А. и др. - БИ, 1978, №23

26. А.С. №661795 (СССР). Прерыватель постоянного тока /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Бенсман В.Г. - БИ, 1979, №17

27. А.С. №725102 (СССР). Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Коломийцев В.Д. и др. - БИ, 1980, №12.

28. А.С. №726599 (СССР). Контактор переменного тока с бездуговой коммутацией /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Бенсман В.Г. и др. - БИ, 1980, №13.

29. А.С. №741332 (СССР). Комбинированный контактор переменного тока /Сосков А.Г., Богуславский В.А. - БИ, 1980, №22.

30. А.С. №748542 (СССР). Контактор переменного тока с бездуговой коммутацией /Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Коломийцев В.Д. и др. - БИ, 1980, №26.

31. А.С. №792346 (СССР). Устройство для бездуговой коммутации цепей постоянного тока /Сосков А.Г., Бенсман В.Г. - БИ, 1980, №58.

32. А.С. №1185426 (СССР). Комбинированный расцепитель многополюсного автоматического выключателя /Терешин В.Н., Намитоков К.К., Сосков А.Г. и др. - БИ, 1985, №38.

33. А.С. №1317603 (СССР). Устройство для дискретного регулирования переменного напряжения /Сосков А.Г., Белоу-

сов А.Ф., Колонтаевский Ю.П. и др. - БИ, 1967, №22.

34. А.С. №1781758 (СССР). Устройство контроля минимального напряжения трехфазной сети /Сосков А.Г., Колонтаевский Ю.П., Смольяненко А.Г. - БИ, 1992, №46.

35. Патент №19371 (СССР). Тиристорный регулятор напряжения /Бушко Б.Н., Бенсман В.Г., Сосков А.Г. и др. - БИ, 1993, №20.

36. Могилевский Г.В., Райнин В.Е., Сосков А.Г., Устименко Б.Ю. Бесконтактные устройства защиты для низковольтных электрических аппаратов. - М.: "Энергия", 1971, -88 с.

37. Сосков А.Г. Тиристорные коммутационные устройства. - Киев, УМКВО, 1989, - 120 с.

38. Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Коломийцев В.Д. и др. Основные направления и результаты разработки контакторов переменного тока с бездуговой коммутацией на токи до 630 А, 330 и 660 В. - Об. докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности производства силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на базе новой техники", ВДНХ, М., 1971.

39. Могилевский Г.В., Сосков А.Г. Основные направления разработки контакторов постоянного тока с бездуговой коммутацией на токи до 630 А напряжением 440 В. - Об. докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности производства силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на базе новой техники", ВДНХ, М., 1971.

40. Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Коломийцев В.Д. Контактники переменного тока с бездуговой коммутацией. - ЭП. "Аппараты низкого напряжения", М., 1971, вып.4.

41. Наметов К.К., Сосков А.Г., Юрченко С.М. Расчет теплового режима силовых полупроводниковых приборов в схемах комбинированных контакторов переменного тока. - Электромеханика, 1986, №11.

42. Сосков А.Г., Долинский Ю.М., Мальтин Н.П. Методика прогнозирования циклоустойкости тиристоров в комбинированных контакторах переменного тока. - Об. "Низковольтные аппараты защиты". - Чебоксары, 1983.

43. Сосков А.Г., Долинский Ю.М., Клименко Б.В. Расчет температуры рипп-структуры тиристоров в импульсном режиме работы. - Об. "Низковольтное аппаратостроение", - Техника, К., 1974.

44. Сосков А.Г., Соскова Е.А. Теоретическое и экспериментальное исследование нагрева тиристоров при длительностях импульсов тока менее 10 мс. - Сб. "Разработка и применение высокоэффективных устройств преобразовательской техники", - Академия наук УССР, К., 1976.

45. Сосков А.Г., Елѣимова Л.В., Соскова И.А. и др. Определение перенапряжений на тиристорах полупроводниковых аппаратов при отключении активно-индуктивной нагрузки. - Сб. "Низковольтные аппараты защиты и управления", Харьков, 1993.

46. Сосков А.Г., Кругляк Е.А. К расчету RC-цепи для защиты тиристоров в реверсивных схемах выключения гибридных контакторов. - Сб. "Аппараты низкого напряжения", вып.8, Чебоксары, 1981.

47. Бенсман В.Г., Сосков А.Г. К вопросу о влиянии динамических свойств тиристоров на выбор параметров контура принудительной коммутации. - Сб. "Низковольтное аппаратостроение", вып.3, Запорожье, 1975.

48. Бенсман В.Г., Сосков А.Г. Выбор способа подключения линейного ограничителя перенапряжений узла емкостной коммутации тиристоров. - Сб. "Низковольтное аппаратостроение", вып.4, Чебоксары, 1977.

49. Долинский Ю.М., Сосков А.Г. Расчет нестационарного температурного поля трехслойной модели тиристора при воздействии импульсов токовой нагрузки. - ЭИ "Аппараты низкого напряжения", -М., вып.2, 1975.

50. Намитков К.К., Сосков А.Г., Юрченко С.И. К теории расчета нестационарного температурного поля тиристоров. - "Электромеханика", 1986, №8.

51. Гапоненко Г.Н., Сосков А.Г., Елѣимова Л.В. и др. Выбор типа силового тиристора бесконтактного коммутационного устройства (БКУ). - Сб. "Низковольтные аппараты защиты и управления", Харьков, 1993.

52. Мотилевский Г.В., Сосков А.Г. Расчет трансформаторов тока для бесконтактных устройств защиты. - "Электротехника", 1966, №10.

53. Мотилевский Г.В., Сосков А.Г. Бесконтактный расцепитель перегрузки для автоматических выключателей постоянного тока. - "Электротехника", 1967, №9.

54. Мотилевский Г.В., Сосков А.Г., Ногорелов Ю.И. Реле перегрузки для автоматических выключателей постоянного тока. - Сб. докладов I Всесоюзной научно-технической конф. "Поле

бесконтактные электронные устройства", М., 1966.

55. Могилевский Г.В., Сосков А.Г., Райнин В.Е. Новые схемы запираания тиристоров. - Сб. докладов III Всесоюзной научно-технической конференции "Новые бесконтактные устройства", М., 1970.

56. Мицкевич Г.Ф., Могилевский Г.В., Сосков А.Г. и др. Полупроводниковые расцепители для автоматических выключателей серии АЗ700. - ЭИ "Аппараты низкого напряжения", М., вып.5, 1971.

57. Белоусов А.Ф., Сосков А.Г., Ефимова Л.В. Регулируемый пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от источника соизмеримой мощности. - Сб. "Теория и математические модели электрических цепей и интегральных схем", К., 1988.

58. Сосков А.Г., Колонтаевский Ю.П., Белоусов А.Ф. Регуляторы (стабилизаторы) напряжения(тока) в технологическом оборудовании для испытания низковольтных аппаратов. - Сб. "Низковольтные аппараты защиты и управления", Чебоксары, 1985.

59. Сосков А.Г., Ефимова Л.В., Райнин В.Е. Процессы выключения динамической нагрузки (асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором). - Сб. "Низковольтные аппараты защиты и управления", - Харьков, 1993.

60. Бездетко В.И., Бенсман В.Г., Сосков А.Г. Улучшение использования силовых полупроводниковых приборов в коммутационных низковольтных аппаратах. - Тезисы докл. VI Всесоюзной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития производства аппаратов низкого напряжения". - Харьков, 1990.

61. Сосков А.Г., Колонтаевский Ю.П. Нелинейные искажения в трансформаторно-тиристорных регуляторах напряжения технологического оборудования. - Тезисы докл. VI Всесоюзной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития производства аппаратов низкого напряжения". - Харьков, 1990.

62. Сосков А.Г. Исследование процесса переключения быстродействующих устройств автоматического включения резерва при различных видах нагрузки. - Тезисы докл. VI Всесоюзной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития производства аппаратов низкого напряжения". - Харьков, 1990.

Подп. к печати 15.04.1994г

Объем 2 п.л.

Формат 60x84/1/16

Тираж 100 экз. Заказ № 2536

Типография ОКБ НИО "ХЭМС" г. Харьков, Московский пр. 138а

AB 30.107