

На правах рукописи



Ермилов Юрий Владимирович

**«ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АППАРАТОВ
РЕГУЛИРОВАНИЯ, ЗАЩИТЫ И КОММУТАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОЛНОСТЬЮ
ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ САМОЛЕТОВ»**

Специальность 05.09.03.

«Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2015

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая электротехника» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ».

Научный руководитель: Доктор технических наук,
профессор кафедры 309 МАИ
С.Б. Резников

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор,
генеральный директор ЗАО "ММП-Ирбис"
Лукин Анатолий Владимирович

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электротехника,
электроника и автоматика»
ФГБУ ВО Московский государственный
технический университет «СТАНКИН»
Филатов Владимир Витальевич

Ведущая организация: Всероссийский электротехнический институт
имени В.И.Ленина. Высоковольтный
научно-исследовательский центр. (ВНИЦ ВЭИ)

Защита состоится «28» декабря 2015г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) «МАИ» по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4., корп. «Г», ауд.302 (кафедра 310).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) МАИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2015г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д212.125.07

к.т.н.



Степанов В.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

К настоящему времени в области авиационно-бортового электрооборудования все большее распространение находит перспективная концепция "полностью электрифицированного самолета" (ПЭС), предполагающая исключение из бортовой системы управления подвижными плоскостями ЛА пневмо- и гидроприводов. Реализация указанной концепции требует значительного увеличения полной установленной мощности авиабортовой системы электроснабжения (СЭС) до величины 1,5 МВт и более, как например, на самолете Боинг-787 с 4-мя магистральными и вспомогательным генераторными каналами. В этой связи предполагается, что в качестве основной системы распределения электроэнергии будет система постоянного повышенного напряжения: СППН 270В или 540В, отраженная в зарубежных и отечественных ГОСТах и имеющая неоспоримые достоинства в сравнении с классической авиационной системой переменного напряжения 115/200В, 400Гц. Основным недостатком СППН, до настоящего времени сдерживающим ее применение, является необходимость оснащения сетевых контакторов и автоматов защиты (от коротких замыканий и утечек в изоляции) громоздкими и недолговечными дугогасительными камерами.

Любая попытка реализации бездугового расцепления, например, с помощью транзисторов, натывается на сложность быстрого (адиабатного) поглощения (без перенапряжения) электромагнитной энергии последовательно-предвключенных сетевых индуктивных элементов и суммируемой с ней энергии, потребляемой от источника за время спада тока (особенно большого при аварийном коротком замыкании (КЗ)). Возможность шунтирования сети фильтрационными электролитическими конденсаторами с относительно большой энергоемкостью ограничена и практически неприменима из-за их нетермостойкости и низкой надежности (безотказности и срока службы).

Проблемам коммутации и защиты в СППН посвящено немало число публикаций зарубежных и отечественных ученых. В последние два десятилетия

наиболее значимые отечественные исследования в этой области принадлежат таким ученым как Е.В. Машуков, Д.А.Шевцов, Г.М. Ульященко, С.И. Вольский, С.Б. Резников, А.В. Гордон, А.В. Шмаков, Е.В. Распертов, В.Б. Черток и др.

Наиболее продвинутыми и обобщающими исследованиями в области полупроводниковых аппаратов защиты и коммутации (АЗК) для авиабортовых СППН 270В являются разработки д.т.н. проф. Машукова Е.В. и д.т.н., проф. Шевцова Д.А. Ими, в частности, рассмотрены два относительно эффективных способа поглощения энергии предвключенных индуктивностей при выключении транзисторного АЗК, являющихся более мощной альтернативой для полупроводникового ограничителя напряжения (ПОН), шунтирующего ключ:

- активное управление транзистором, обеспечивающее его стабилитронную характеристику и адиабатное поглощение энергии кристаллической структурой;
- шунтирование ключа разгрузочным (балластным) резистором через вспомогательный транзистор.

Первый из них, как будет доказано в 1-й главе, способен минимизировать величину поглощаемой энергии в пределе – до значения: $W_{Lcemu} \frac{K_U}{K_U - 1}$, где K_U - кратность прямоугольного скачка напряжения в сети, но требует разработки специального "термоударостойкого" транзистора с большой теплоемкостью кристалла, а второй - не способен минимизировать указанную энергию, хотя и более прост в реализации (на базе "термоударостойкого" балластного резистора).

С учетом вышеизложенного и тенденции к наращиванию установленной мощности СППН для ПЭС (до 1,5 МВт и более) представляется целесообразным дальнейшее развитие второго способа, но с более гибкой (регулируемой) структурой разгрузочного (балластного) резистивного узла и обеспечением полной гальванической развязки.

Помимо вышеуказанной задачи, целесообразно при разработке АЗК учесть возможность расширения функций за счет регулирования токов и напряжений в каналах электропитания, а также рекуперации электроэнергии.

Представляется также целесообразным для ускорения процесса реализации концепции ПЭС на сегодняшнем промежуточном этапе перехода от контактной к полупроводниковой защитно-коммутационной аппаратуре использовать сначала комбинированные СЭС переменного-постоянного тока с фрагментарным введением звеньев ППН (аналогично СЭС Боинга 787), только для параллельного включения каналов питания (без подключения нагрузок), а затем, по мере накопления опыта освоения п/п АЗК, постепенно расширять зоны цепей распределения ППН 270(540)В с учетом проблемы импортозамещения по элементной базе и поэтапной преемственности в схемотехнических и технологических разработках.

Исходя из современных требований к импортозамещению и к поэтапности внедрения новых технологий в авиапромышленности можно сделать следующие выводы

- штатная коммутация в СППН на базе транзисторных АЗК в настоящее время затруднена из-за отсутствия отечественных силовых транзисторных ключей с требуемыми параметрами.
- Использование вместо транзисторных ключей – отечественных тиристоров с искусственным запирающим (или двухоперационных) ограничено относительно большими статическими тепловыми потерями и соответствующей громоздкостью системы охлаждения.
- На переходном этапе внедрения СППН в качестве приемлемой альтернативы предлагается использование коммутационных шин и вспомогательных тиристоров с «редкоимпульсным» режимом работы

Из вышеуказанного следует, что тема настоящей диссертации является актуальной.

Цель работы:

Разработка высокоэффективных принципов и средств регулирования сетевого напряжения и коммутации цепей с учетом адиабатного поглощения электроэнергии разгрузочными узлами в аварийных быстродействующих выключателях (АБВ) и ее минимизации, а также бездуговой штатной коммутации в авиабортовых сетях постоянного повышенного напряжения (СППН 270 и 540В) и рекомендаций к

проектированию аппаратов регулирования, защиты и коммутации (АРЗК) для полностью электрифицированных самолетов (ПЭС).

Задачи, решаемые для достижения цели:

- обзор и анализ известных принципов и средств регулирования, защиты и коммутации в авиабортовых СППН;
- разработка нетрадиционных высокоэффективных принципов, структур и схемотехнических решений для АРЗК;
- аналитический расчет рабочих процессов и оптимизация законов управления;
- компьютерное моделирование процессов;
- экспериментальное подтверждение теоретических положений и разработка рекомендаций к проектированию и компьютерному моделированию.

Методы исследования: при решении поставленных задач использованы основные положения электротехники, математического анализа и теории автоматического управления. Компьютерное моделирование проводилось в программе Electronics Workbench 10.

Научная новизна диссертационной работы:

- разработан способ обеспечения максимального быстродействия процесса аварийной коммутации (при ограничении сетевого перенапряжения с учетом электромагнитной энергии последовательно-предвключенных сетевых индуктивностей) для минимизации энергии выделенной источником за время выключения тока в СППН;
- разработан способ импульсного преобразования постоянного напряжения и устройство для его осуществления, позволяющий получать выходное напряжение с произвольно задаваемой периодически непрерывной формой
- разработан нетрадиционный принцип построения конверторов на базе безреверсивного индуктивного накопителя, обеспечивающий

безынерционность переключения направлений преобразования и высокое качество процессов регулирования;

- получено аналитическое выражение зависимости минимального адиабатного энергопоглощения в разгрузочном узле от величин тока короткого замыкания и допустимой кратности перенапряжения в сети;
- разработан принцип построения и алгоритм управления СППН на базе коммутационных шин для штатной коммутации и устройств селективной защиты от КЗ;
- построена компьютерная модель КАЗК в среде Electronics Workbench 10, позволяющая оптимизировать законы управления и параметры схем.

Практическая значимость работы: в ходе исследовательской работы предложены схемотехнические решения (защищенные приоритетом РФ) для следующих устройств:

- комбинированный аппарат защиты и коммутации (КАЗК), позволяющий осуществлять аварийное расцепление в бортовой СППН, без перенапряжения на п/п ключевом элементе;
- комбинированный аппарат защиты и коммутации переменного постоянного тока, позволяющий осуществлять рекуперацию электроэнергии;
- многофункциональный аппарат регулирования защиты и коммутации (АРЗК), обладающий расширенными функциональными возможностями, такими как аварийная коммутация, регулирование и стабилизация с учетом коррекции коэффициента мощности (ККМ), а также обратимое преобразование переменного (3-х фазного) и постоянного напряжений;
- обратимый импульсный конвертор, с безынерционным переключением направлений преобразования и высоким качеством процессов регулирования;

- импульсный преобразователь напряжений с гальванической развязкой и защитой от «сквозных сверхтоков», позволяющий обеспечить питанием коммутационные шины для бездугового размыкания контакторов.

Реализация результатов

Материалы диссертационной работы были использованы в госбюджетной НИР МАИ (тема №1.4.12, этап №8, 2013 год), в курсе лекций, в дипломном и курсовом проектировании кафедры «Теоретическая электротехника» МАИ и при подготовке монографии «Электромагнитная и электроэнергетическая совместимость систем электроснабжения и вторичных источников питания полностью электрифицированных самолетов». С.Б.Резников, В.В.Бочаров, И.А.Харченко. –М.: Из-во МАИ-ПРИНТ, 2014.-160с

Апробация работы: Основные результаты работы докладывались на научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике», Москва, 2013 год, и на научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике», Москва, 2014 год.

Публикации: Материалы, отражающие содержание диссертационной работы и полученные в ходе ее выполнения, опубликованы в 5 статьях, из которых 4 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК РФ и в 2 сборниках тезисов докладов на конференциях. Также были получены 9 патентов на полезную модель и 1 патент на изобретение.

Основные положения выносимые на защиту:

- 1) разработанный способ обеспечения максимального быстродействия процесса аварийной защиты от КЗ (при ограничении ГОСТом перенапряжения в сети и с учетом последовательно-предвключенных сетевых индуктивностей) для минимизации адиабатно-поглощаемой энергии в балластном ограничителе для минимизации энергии, выделенной источником электропитания за время выключения аварийного тока в СППН;
- 2) полученное аналитическое выражение зависимости минимального энергопоглощения от аварийного тока и допустимой кратности перенапряжения в сети;

- 3) разработанные способ и алгоритм управления системой распределения постоянного повышенного напряжения, предполагающий использование коммутационной шины с регулируемым напряжением для осуществления переключений в штатном режиме;
- 4) предложенное схемотехническое решение для комбинированного аппарата защиты и коммутации (КАЗК), позволяющего осуществлять аварийное расцепление в бортовой сети постоянного повышенного напряжения без перенапряжения на ключевом элементе;
- 5) предложенные аналитические выражения и компьютерная модель, позволяющая оптимизировать законы управления и параметры схем КАЗК;
- 6) разработанный двунаправленный комбинированный аппарат защиты и коммутации переменного-постоянного тока, допускающий рекуперацию электроэнергии;
- 7) разработанный аппарат регулирования защиты и коммутации (АРЗК), с расширенными функциональными возможностями, такими как аварийная коммутация, регулирование и двунаправленное преобразование напряжения.

Достоверность научных результатов

Достоверность научных результатов и рекомендаций, отраженных в диссертационной работе, подтверждаются совпадением результатов аналитических расчетов и компьютерного моделирования с результатами экспериментального исследования.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемых источников. Она содержит 133 страницы, в том числе 61 рисунок и 1 таблицу. Список используемых источников содержит 36 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении показана актуальность темы, поставлены цель и задачи работы. Представлены апробация работы, а также ее научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена описанию одного из наиболее перспективных направлений развития авиационных систем электроснабжения (СЭС) - СЭС с первичной системой постоянного повышенного напряжения (СППН). Частично СППН реализована в составе СЭС самолета Boeing-787, но там она является только промежуточной – для параллельного включения каналов, т.е. без собственной коммутационно-защитной аппаратуры (электромеханической или полупроводниковой).

Основным недостатком СППН, до настоящего времени сдерживающим их применение и по существу нейтрализующим все достоинства, является необходимость оснащения штатных сетевых контакторов и аварийных автоматов защиты (от коротких замыканий и утечек в изоляции) громоздкими и недолговечными дугогасительными камерами. Любые попытки реализации бездугового выключения сверхтоков, например - с помощью вакуумных выключателей, ключевых транзисторов и запираемых тиристоров, приводит к сложности адиабатного поглощения энергии предвключенных сетевых индуктивностей $\left(\frac{LI_m^2}{2}\right)$ и суммируемой с ней энергии, потребляемой от источника за время спада тока $\left(\int_0^{t_{\text{выкл}}} UI dt\right)$, без перенапряжений на самом выключателе и сетевых нагрузках.

До настоящего времени для решения этой проблемы в СППН наземного сетевого транспорта использовались контакторы с дугогасительными камерами, отличающиеся недолговечностью, большой массой и габаритами, что делает их непригодными для авиабортовых СЭС. Также приводится расчет энергии адиабатно поглощаемой балластным ограничителем напряжения выключателя. При неучете активного сопротивления сети получаем временную зависимость спадающего тока – как решение простейшего дифференциального уравнения:

$$U_{II} = L \frac{dI}{dt} + U_m \quad (1)$$

$$\text{в виде линейной функции: } I(t) = I_m - \frac{U_m - U_{II}}{L} \cdot t \quad , \quad (2)$$

откуда время спада t_{cn} тока $I(t)$ до нуля будет: $t_{cn} = \frac{LI_m}{U_m - U_{II}}$. (3)

За это время транзисторный переход или балластный ограничитель напряжения должен рассеять энергию, накопленную в сетевой предвключенной индуктивности, и энергию, поступающую от источника питания:

$$\sum W = \frac{L_c I_m^2}{2} + \int_0^{t_{cn}} U_{II} I(t) dt = \frac{L_c I_m^2}{2} + U_{II} \frac{I_m}{2} t_{cn} \quad (4)$$

Подставив (3) в (4), получаем выражение для адиабатно поглощаемой балластным узлом энергии:

$$\sum W = \frac{LI_m^2}{2} \cdot \frac{U_m}{U_m - U_{II}} = \frac{LI_m^2}{2} \cdot \frac{K}{K - 1}, \quad (5)$$

где $K = \frac{U_m}{U_{II}} > 1$ – кратность перенапряжения на транзисторе в “стабилитронном” режиме (или на шунтирующем ПОН).

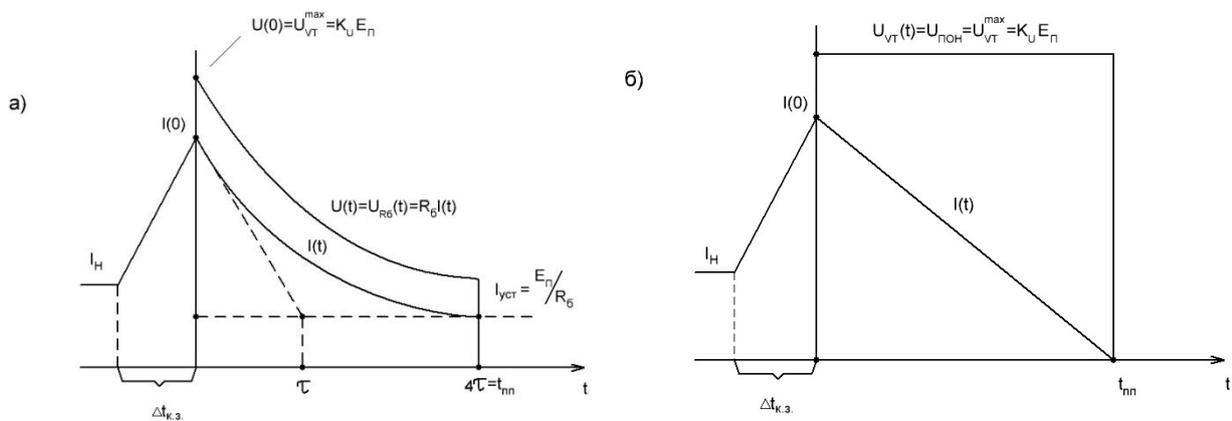


Рис.1

На Рис.1 представлены типовые и идеализированные временные диаграммы тока короткого замыкания $I(t)$ и напряжения на транзисторе для аварийных быстродействующих выключателей а) ABB_{RB} , б) $ABB_{ПОН}$

В работе приведен анализ способов защиты от импульсов перенапряжения на ключевых элементах, на основании которого сделан вывод о целесообразности, разработки принципиально новых способов аварийной защиты для СППН.

Рассмотрены и сравнены существующие импульсные регуляторы и стабилизаторы постоянного напряжения.

Поставлена задача разработки унифицированных многофункциональных модулей, совмещающих функции двунаправленного регулирования и стабилизации постоянного напряжения, в частности – обратимых импульсных конверторов (ОИК) и функцию АБВ.

Вторая глава посвящена разработке принципов и средств регулирования и коммутации сетевого напряжения и процессов адиабатного поглощения электроэнергии разгрузочными резисторами в АБВ и ее минимизации, а также бездуговой и безыскровой штатной контакторной коммутации в авиабортовых сетях постоянного повышенного напряжения (СППН 270 и 540В). Разработанный в ходе исследований комбинированный электронно-электромеханический аппарат защиты и коммутации (Рис.2) позволяет обеспечить максимальное быстроедействие адиабатного поглощения энергии, накопленной в предвключенной индуктивности проводов и обмоток генераторов, а также выделенной источником. Также представлен АРЗК, в котором реализован нетрадиционный принцип построения конверторов на базе безреверсивного индуктивного накопителя. Он обладает расширенными функциональными возможностями, такими как: обратимое регулирование напряжения, стабилизация напряжения, а также защита и коммутация (Рис.3).

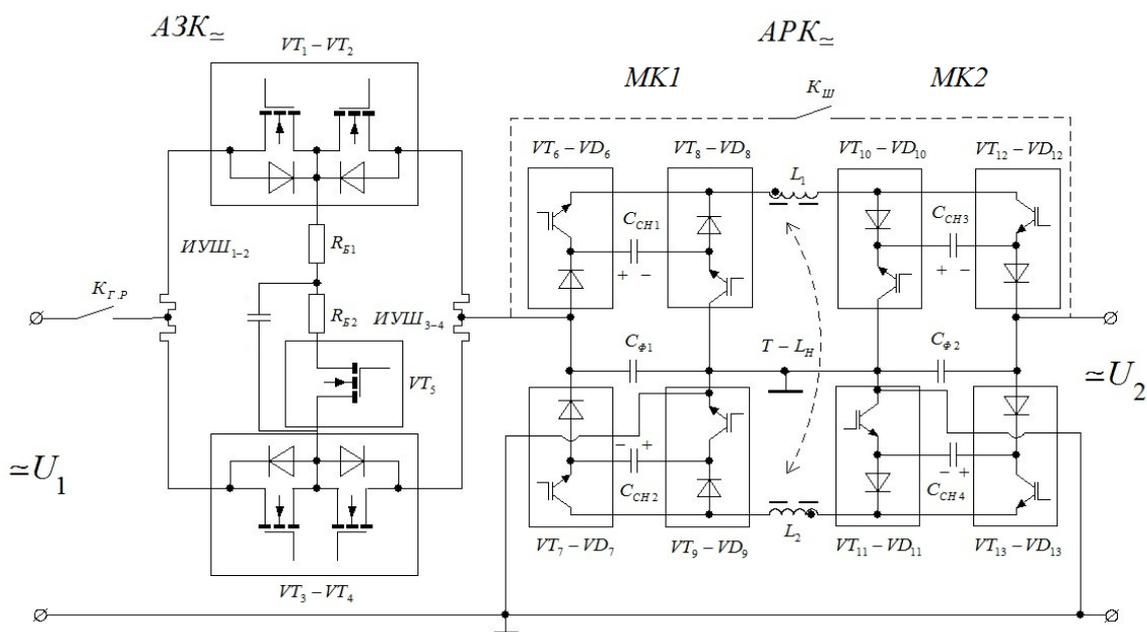


Рис.4

Рассматриваются разработанный принцип построения и алгоритм управления для СПН, предполагающий использование дополнительной (коммутационной) шины с регулируемым напряжением для бездуговых (и безыскровых) переключений, в штатном режиме. Предложен ряд схемотехнических решений по построению регуляторов напряжения для питания коммутационной шины. На Рис.5 представлена упрощенная структура одного канала многоканальной комбинированной автономной системы электроснабжения без привода постоянной частоты вращения генератора с первичной системой генерирования и распределения переменного тока нестабильной частоты и тремя вторичными системами распределения, из которых дифференциальная СПН ($0 \pm 270\text{В}$ или $0 \pm 135\text{В}$) построена на базе коммутационных шин.

Третья глава посвящена расчету оптимального и "квазиоптимальных" процессов регулирования КАЗК при коротком замыкании. Получено условие для оптимального процесса спада тока короткого замыкания до нуля, исходя из теоремы Фельдбаума об "n-1" переключении в линейных системах «n»-го порядка.

Проведенная аналитическая оптимизация импульсного управления для КАЗК авиационно-бортовых СППН позволяет создать указанные выключатели с минимальной адиабатно-поглощаемой энергией.

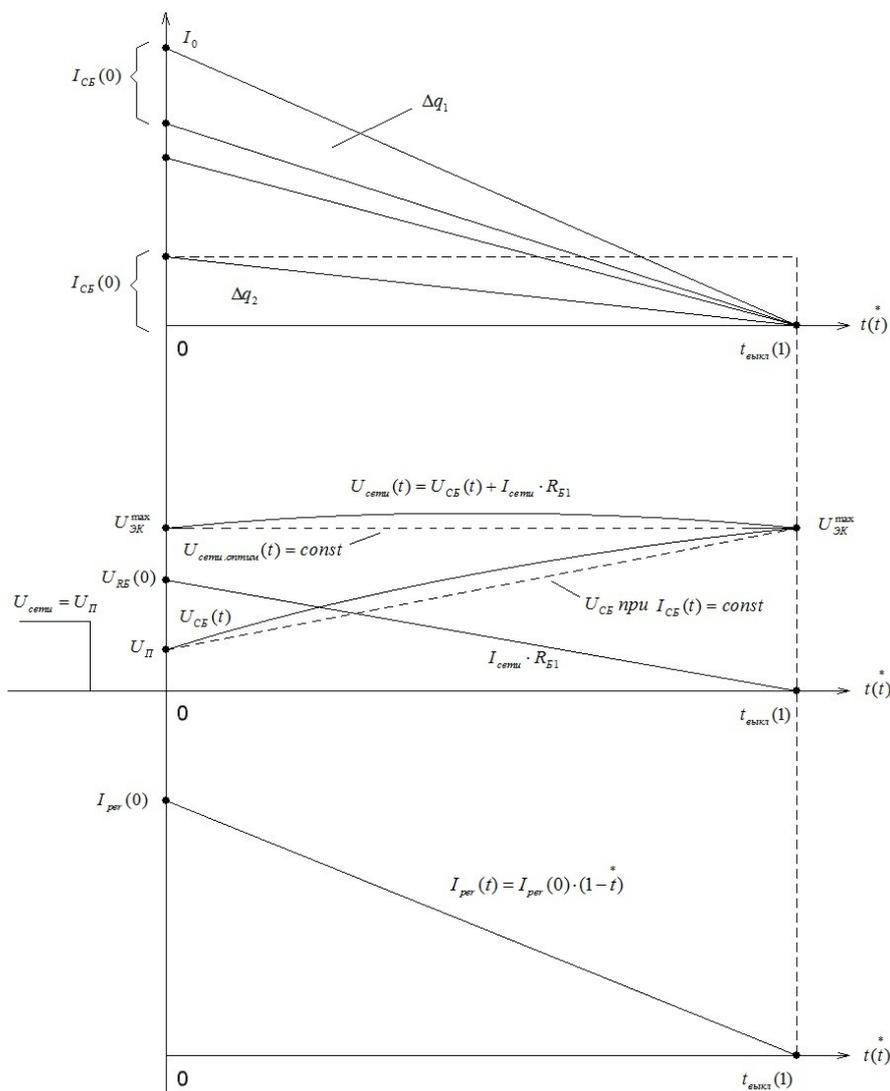


Рис.6

На Рис.6 приведены временные диаграммы для "квазиоптимального" процесса выключения тока короткого замыкания с помощью АЗК с линейно спадающим током регулирования АЗК ($I_{пер}$)

Четвертая глава посвящена компьютерному моделированию КАЗК в программе Electronics Workbench 10 (Рис.7).

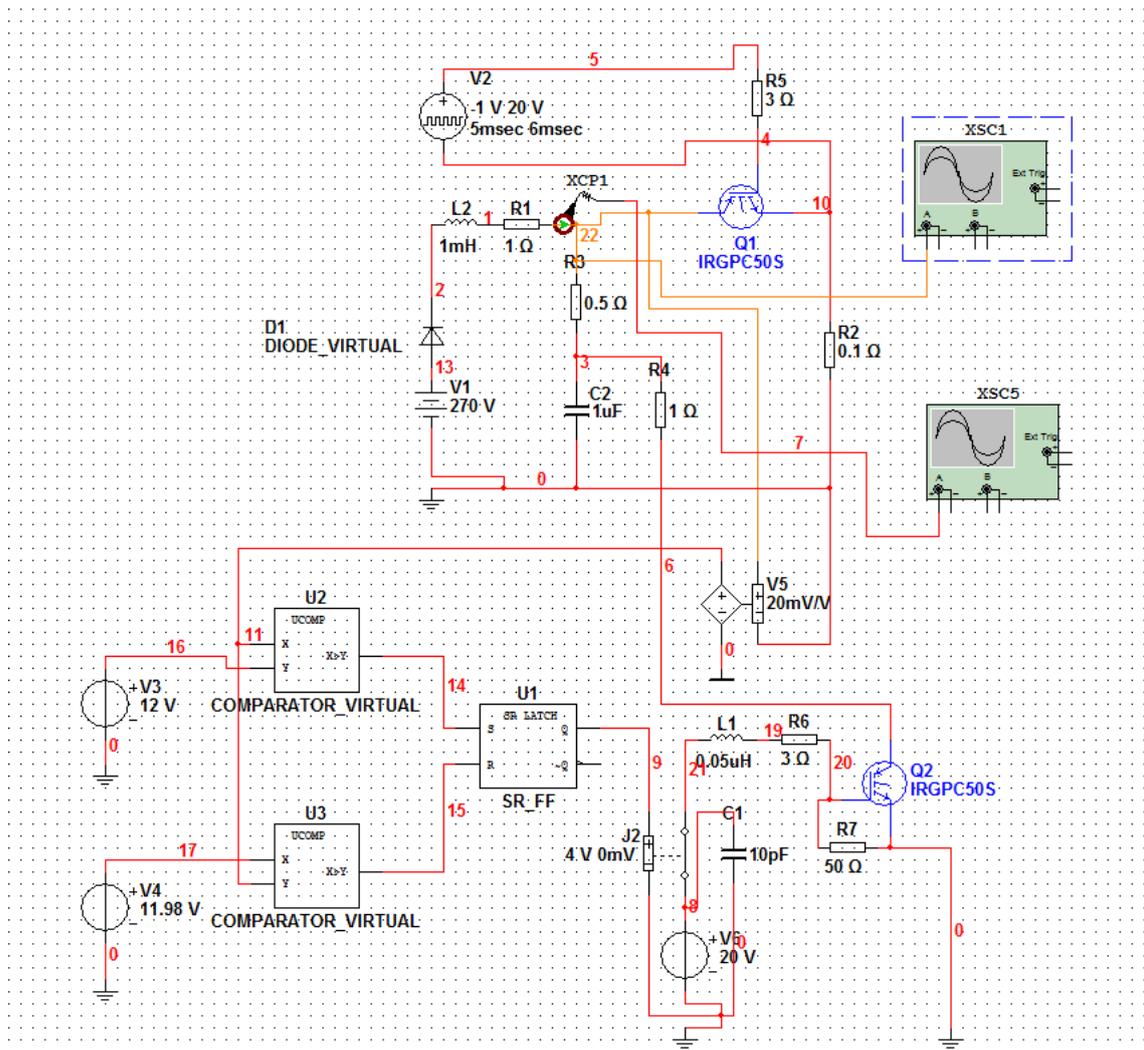


Рис.7

Приведены результаты моделирования: осциллограмма напряжения на АБВ (цепи R2 -C2) (Рис.8),

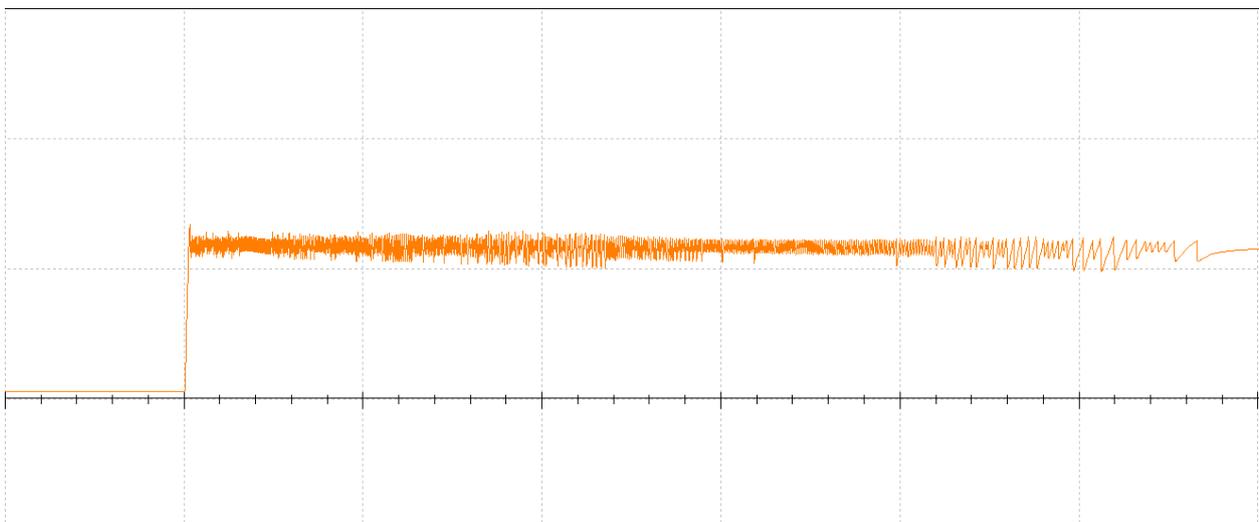


Рис.8

а также осциллограмма спада тока короткого замыкания (Рис.9).

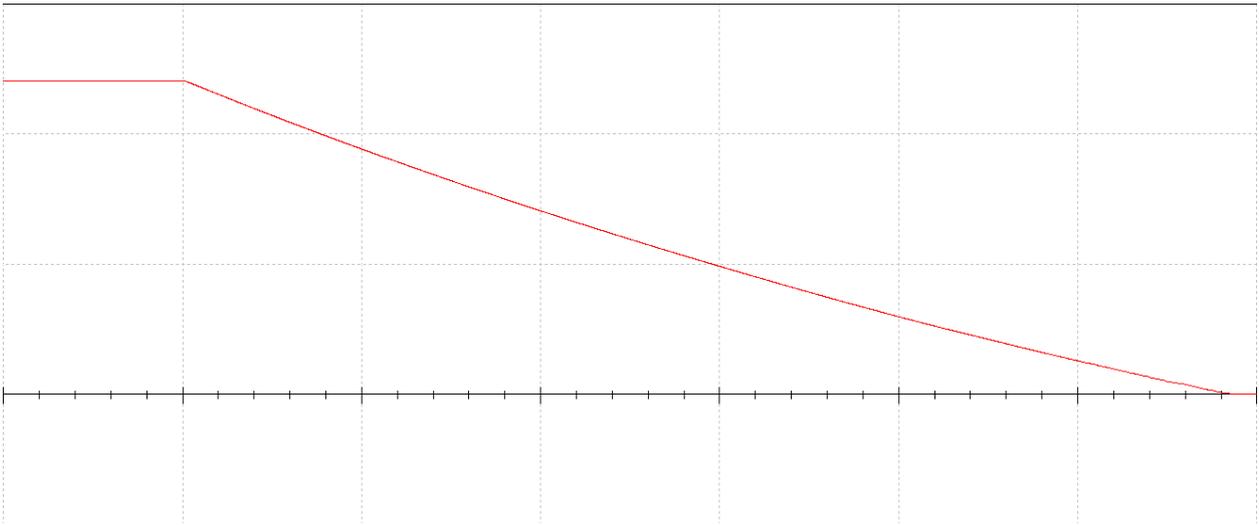


Рис.9

Также были построены модели применяемых на данный момент устройств защиты от коротких замыканий. Результаты сравнительного моделирования наглядно показали, преимущество предлагаемого способа защиты и коммутации перед существующими.

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям и рекомендациям к проектированию.

Были экспериментальные исследования КАЗК на лабораторном макетном образце (Рис.10). Результаты экспериментов незначительно отличаются от результатов моделирования (с погрешностью по интегральным параметрам 5-10%). На Рис.11 представлены осциллограммы напряжения на АБВ и аварийного тока.



Рис.10

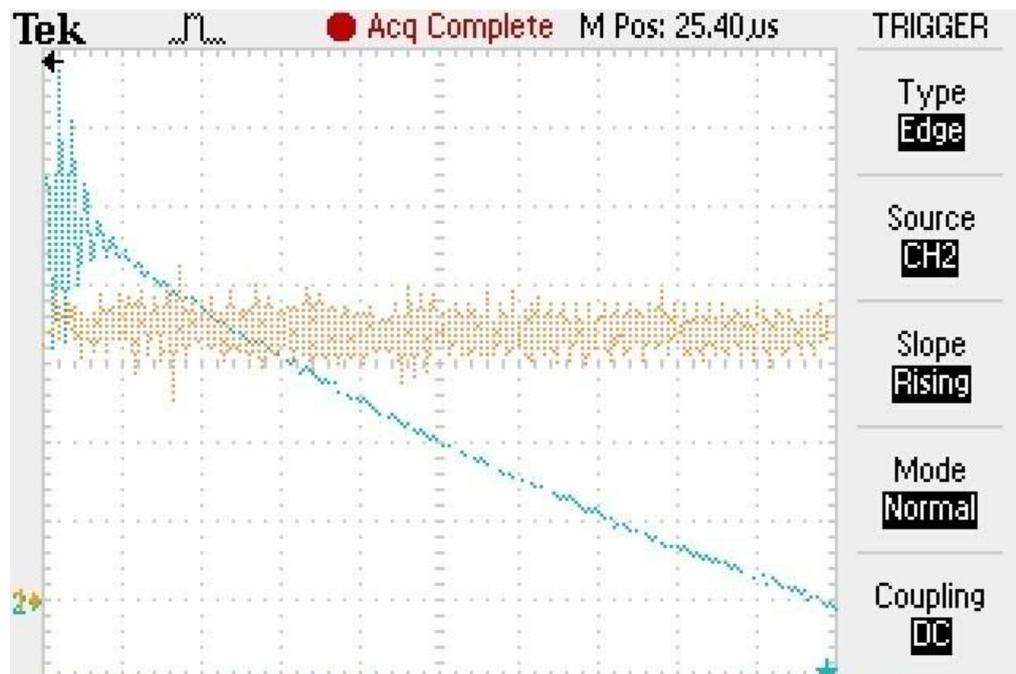


Рис.11

При проектировании аварийного быстродействующего выключателя (АБВ в составе АРЗК), представляется целесообразным использовать следующие рекомендации:

1. Использовать алгоритм управления, блок-схема которого изображена на Рис. 12.
2. Для оптимизации параметров схемы использовать компьютерную модель АБВ, описанную в главе 4.
3. Для расчета времени адиабатного поглощения в АБВ энергии, накопленной в предвключенных индуктивностях проводов и обмотках генераторов использовать приближенную формулу: $t_{cn} = \frac{LI_m}{U_m - U_{II}}$

4. Для расчета энергии, поглощаемой балластным резистором в составе АБВ при условии поддержания напряжения сети на максимально допустимом уровне использовать формулу, представленную в главе 1:

$$\sum W = \frac{LI_m^2}{2} \cdot \frac{U_m}{U_m - U_{II}} = \frac{LI_m^2}{2} \cdot \frac{K}{K-1}, \text{ где } K = \frac{U_m}{U_{II}} > 1 - \text{кратность перенапряжения на}$$

транзисторном ключе (существенно ограниченная в ГОСТ и требующая согласования частных технических условий).

В заключении приводятся основные выводы и результаты по диссертационной работе.

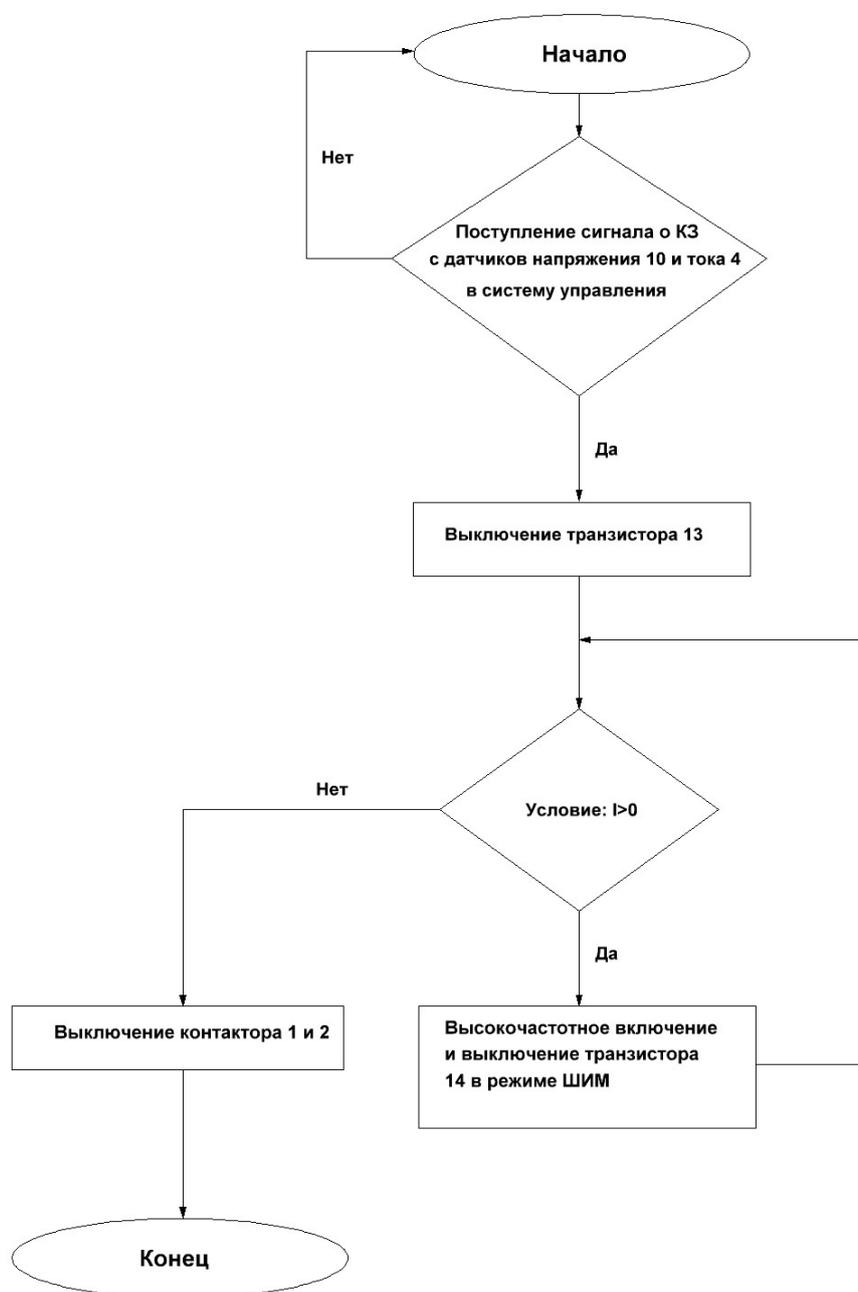


Рис.12

Основные выводы и результаты работы

1. Разработан принцип бездуговой аварийной коммутации силовых цепей постоянного повышенного напряжения, позволяющий отказаться от использования контакторов с громоздкими дугогасительными камерами, а также специальных транзисторных ключей (или ПОН) с большой теплоемкостью кристаллической структуры.
2. На базе вышеуказанного способа разработана схема двунаправленного электронно-электромеханического комбинированного аппарата защиты и коммутации (КАЗК) на базе аварийного быстродействующего выключателя (АБВ) с термоударостойким разгрузочно-балластным резистивным узлом и ШИМ-регулятором.
3. Разработан многофункциональный аппарат регулирования, защиты и коммутации, обладающий расширенными функциональными возможностями, такими как двунаправленная коммутация, регулирование и преобразование напряжения (с учетом рекуперации энергии).
4. Разработан принцип построения и алгоритм управления для бортовых подсистем постоянного повышенного напряжения предполагающие использование коммутационных шин для осуществления индивидуальной и групповой коммутации нагрузок в штатном режиме.
5. Предложены схемотехнические решения для импульсных блоков питания и регулирования (стабилизации) напряжения на распределительных и коммутационных шинах.
6. Предложен способ двунаправленного преобразования напряжения, в котором для сглаживания пульсаций используется накопительный реактор, позволяющий исключить электролитические конденсаторы, с низкими показателями надежности (термостойкости безотказности и срока службы)
7. В программе Electronics Workbench 10 построена компьютерная модель КАЗК. Также, для сравнения, построены компьютерные модели наиболее часто используемых устройств защиты силовых полупроводниковых ключей. Проведен сравнительный анализ и показаны преимущества предлагаемого устройства.

8. Разработан аппарат регулирования защиты и коммутации (АРЗК), с расширенными функциональными возможностями, такими как аварийная коммутация, регулирование и двунаправленное преобразование напряжения.
9. Разработан нетрадиционный принцип построения конверторов на базе безреверсивного индуктивного накопителя, обеспечивающий безынерционность переключения направлений преобразования и высокое качество процессов регулирования.
10. Результаты проведенных экспериментальных исследований совпали с результатами компьютерного моделирования с удовлетворительной погрешностью и подтвердили обоснованность принципа обеспечения максимального быстродействия процесса аварийной коммутации (при ограничении сетевого перенапряжения и с учетом электромагнитной энергии последовательно-предвключенных сетевых индуктивностей и энергии, выделенной источником за время спада тока).
11. Проведена аналитическая оптимизация импульсного управления предложенным комбинированным аппаратом защиты и коммутации для авиационно-бортовых систем электроснабжения (СЭС) постоянного повышенного напряжения (СППН).
12. Разработаны рекомендации к проектированию КАЗК позволяющие значительно сократить время проектирования.

Результаты, полученные в ходе диссертационной работы, могут быть использованы при разработке авиационной бортовой коммутационной аппаратуры, а также регуляторов и преобразователей напряжения в комбинированных системах электроснабжения постоянно-переменного тока, полностью электрифицированных самолетов (ПЭС). Предложенные схемотехнические и алгоритмические решения позволяют создать универсальные аппараты регулирования защиты и коммутации (АРЗК), способные обеспечить бездуговую коммутацию в силовых цепях (аварийных) цепях постоянного повышенного напряжения, а также работать в режиме регулирования и коррекции коэффициента мощности в обратимых

выпрямительно-инверторных преобразователях с рекуперацией электроэнергии электроприводов.

Представляются перспективными дальнейшее развитие подсистем распределения постоянного повышенного напряжения, на базе модульной архитектуры регуляторов напряжения, а также разработка централизованных цифровых систем диагностики и предотвращения аварийных режимов в составе авиационной системы электроснабжения.

Публикации по теме диссертационной работы

1. Энергоэкономичная структура комбинированной автономной системы электроснабжения без стабилизации частоты вращения генератора. Авторы: В.В. Бочаров, С.Ф. Коныхин, С.Б. Резников, И.Н. Соловьев, Ю.В. Ермилов. Практическая силовая электроника №2(46) 2012. год.
2. Комбинированный электронно-электромеханический аппарат защиты и коммутации для систем распределения постоянного повышенного напряжения. Авторы: В.В. Бочаров, С.Ф. Коныхин, С.Б. Резников, И.Н. Соловьев, Ю.В. Ермилов. Практическая силовая электроника №2(50) 2013 год
3. Выключатель постоянного тока. Патент на полезную модель №112797. Авторы: Резников С.Б.Бочаров В.В. Коныхин С.Ф. Ермилов Ю.В. Бюл.– 2012 - №2. – С.2.
4. Автономная система электропитания. Патент на полезную модель №124454. Авторы: Резников С.Б.Бочаров В.В. Харченко А.И., Коныхин С.Ф. Ермилов Ю.В. Бюл. – 2013 - №2. – С.2.
5. Импульсный преобразователь напряжений. Патент на полезную модель №125416. Авторы: Резников С.Б.Бочаров В.В. Харченко А.И., Руруа К.С., Ермилов Ю. В. Бюл. – 2013 - №6. – С.2.
6. Импульсный преобразователь частоты. Патент на полезную модель №125426. Авторы: Резников С.Б.Бочаров В.В. Харченко А.И., Ермилов Ю. В. Бюл. – 2013 - №6. – С.2.
7. Обратимый преобразователь постоянного напряжения с инверторно-трансформаторным звеном высокой частоты. Патент на полезную модель

- №125787. Авторы: Резников С.Б.Бочаров В.В. Харченко А.И., Ермилов Ю. В. Бюл. – 2013 - №7. – С.2.
8. Обратимый импульсный конвертор. Патент на полезную модель №125426. Авторы: Резников С.Б.Бочаров В.В. Харченко А.И., Руруа К.С., Ермилов Ю. В. Бюл. – 2013 - №8. – С.2.
9. Многофазный регулируемый инвертор. Патент на полезную модель №124858. Авторы: Резников С.Б.Бочаров В.В. Харченко А.И., Коняхин С.Ф., Ермилов Ю.В. Бюл. – 2013 - №4. – С.2.
10. Преобразователь переменного напряжения в постоянное. Патент на полезную модель №127547. Авторы: Резников С.Б.Бочаров В.В. Харченко А.И., Коняхин С.Ф. Ермилов Ю.В. Бюл. – 2013 - №4. – С.3
11. Способ импульсного преобразования постоянного напряжения и устройство для его осуществления. Патент на изобретение №2510871. Авторы: Резников С.Б.Бочаров В.В. Харченко А.И., Ермилов Ю. В. Бюл. – 2014 - №10. – С.9.
12. Автономная система электроснабжения. Патент на полезную модель №126223. Авторы: Резников С.Б.Бочаров В.В. Харченко А.И., Ермилов Ю. В. Бюл. – 2013 - №8. – С.2.
13. Многофункциональные конверторно-инверторные преобразователи для авиационных систем электроснабжения. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск №71. 2013 год. Авторы: Резников С.Б., Бочаров В.В., Лавринович А.В., Ермилов Ю. В., Харченко А.И.
14. Резников С.Б., Бочаров В.В., Лавринович А.В., Ермилов Ю. В., Харченко А.И. Универсальные аппараты регулирования защиты и коммутации переменного тока с модульной архитектурой для систем электроснабжения полностью электрифицированных самолетов. Журнал Практическая силовая электроника №2(54). 2014 год.