

На правах рукописи



Машинский Вадим Викторович

**Резервная система генерирования электрической энергии для  
летательных аппаратов**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Харитонов Сергей Александрович

**Официальные оппоненты:** Халютин Сергей Петрович  
доктор технических наук, профессор,  
генеральный директор «Экспериментальная мастерская НаукаСофт»  
г. Москва

Семенов Валерий Дмитриевич  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры промышленной электроники,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»  
г. Томск.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» г. Томск

Защита состоится «05» марта 2015 г. в 12 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru) .

Автореферат разослан «\_\_\_» января 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Нейман Владимир Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Сегодняшний этап развития авиационной техники характеризуется резким увеличением энерговооруженности воздушных судов, так например общая мощность энергетических установок в ТУ-154 составляла - 120кВА, в ТУ-204 более 210кВА, а в Boeing787 уже 1450 кВА, это связано с ростом применения на современных летательных аппаратах (ЛА) электронных систем управления, связи и навигации, а также с постепенной реализацией концепции «полностью электрифицированного самолета» («All electric aircraft»)<sup>1</sup>. Для удовлетворения роста потребностей в электрической энергии необходимо повышение мощности бортовых систем генерирования, как основных, так и вспомогательных и аварийных. Различные аспекты теоретического и практического плана построения систем генерирования и отдельных её элементов для автономных объектов нашли отражение в трудах И.И. Алексева, В.Г. Андреева, Е.И. Беркович, Н.И. Бородина, Д.Э. Брускина, Д.А. Бута, Ю.М. Быкова, А.Г. Гарганеева, Г.В. Грабовецкого, Подъякова Е.А, Б.С. Зечихина, В.В. Иванцова, Ю.М. Инькова, Л.К. Ковалева, Ю.И. Конева, Н.Т. Коробана, Коняхина С.Ф., Н.Н. Лаптева, А.В. Левина, В.Л. Лотоцкого, И.И. Лукина, Б.В. Лукутина, В.С. Моина, В.И. Мелешин, И.В. Нежданова, В.И. Радина, Э.М. Ромаша, Г.А. Сипайлова, Л.Е. Смольникова, Б.П. Соустина, Н.П. Старовойтовой, В.Е. Тонкаля, В.В. Филатова, С.П. Халютин, С.А. Харитонов, В.А. Цишевского, Е.Е. Чаплыгина, М.М. Юхнина и многих других.

Создание полностью электрифицированного самолета (ПЭС) является одним из перспективных направлений в развитии современной авиации. В самолете, удовлетворяющем концепции ПЭС, используется один вид энергии, а именно, электрическая энергия. В этом случае система энергоснабжения применяется для питания наиболее энергоемких систем, которые традиционно использовали для своего функционирования гидравлическую и пневматическую энергию (системы запуска электродвигателя, системы управления аэродинамическими поверхностями и взлетно-посадочным оборудованием, системы кондиционирования и т.д.). Использование системы электроснабжения в качестве единственной энергетической системы самолета позволяет:

- снизить номенклатуру агрегатов применяемых в самолете за счет полной ликвидации гидравлических и пневматических агрегатов;
- повысить эффективность использования энергии на борту за счет исключения отбора воздуха от компрессора авиадвигателя;
- резко повысить отказоустойчивость ЛА в целом, за счет перехода от гидравлических и пневматических распределительных систем к электрическим и организации значительного числа независимых каналов системы электроснабжения;
- существенно снизить затраты на разработку и производство ЛА.

---

<sup>1</sup> Helsley, C., "Power by Wire for Aircraft - The All-Electric Airplane," SAE Technical Paper771006, 1977г.

По оценкам ведущих российских компаний (ОАО «АКБ Якорь», ОАО «Аэроэлектромаш», ФГУП «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского и т.д.) занимающихся разработкой авиационной техники реализация концепции ПЭС позволит:

- снизить потребление топлива на 8-12%;
- снизить полную взлетную массу на 6-10%;
- снизить прямые эксплуатационные расходы на 4-10%;
- снизить стоимость жизненного цикла ЛА на 3-5%;
- снизить время технического обслуживания на 4-4,5%;

В этом русле развития систем электропитания ЛА особое место занимают резервные или аварийные системы электропитания, предназначенные для работы в аварийном режиме при выходе из строя основных (первичных) систем электропитания. При этом происходит отключение большей части потребителей и электроэнергия подается только наиболее критичным потребителям (системы управления, навигации и т.д.), соответственно мощность резервных систем генерирования была на порядки ниже основных. Для сравнения в самолете ИЛ-86 суммарная мощность основных систем генерирования 120кВт, а мощность резервной системы генерирования 1кВт. Сегодня с увеличением энерговооруженности воздушных судов, количество и суммарная мощность критичных потребителей значительно увеличилась и требуется увеличение мощности резервной системы электропитания среднемагистрального самолета на порядок до уровня не менее 15-30кВт. Это происходит как из-за увеличения мощности основных потребителей электрической энергии, так и многих других факторов, например из-за необходимости соблюдения международных требований к безопасности полетов. Например, требования ETOPS (Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards), нормы к выполнению полётов на двухмоторном самолёте на малоориентированной местности, разработанные ИКАО (Международной организацией гражданской авиации) требуют от резервной системы электроснабжения ЛА обеспечить при отказе одного из двигателей работоспособность основных систем воздушного судна в течении 2-х часов. Это позволяет обеспечить полет воздушного судна через океан, пустыню, либо полярные зоны. При обеспечении этих требований количество потребителей на борту значительно возрастает, тем самым увеличивая необходимую мощность резервной системы электроснабжения ЛА.

Учитывая вышесказанное задача создания резервных систем генерирования электрической энергии ЛА повышенной мощности, несомненно, является особо важной при проектировании современных ЛА.

Создание эффективных резервных СГЭЭ ЛА обеспечит минимизацию массогабаритных показателей, повысит функциональные возможности (режим авторотации), а также обеспечит высокое качество генерируемой электрической энергии в статических и динамических режимах.

**Целью исследования** является решение важной научно-технической задачи по повышению эффективности резервной системы генерирования электрической энергии переменного тока для ЛА путем разработки новых схемных, конструктивных решений и алгоритмов управления.

Для достижения сформулированной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработана математическая модель резервной СГЭЭ ЛА на базе магнитоэлектрического генератора и инвертора напряжения, построенного с использованием модульного принципа

2. Проведен анализ основных электрических процессов в СГЭЭ ЛА в различных режимах её работы.

3. Разработана конструкция полупроводникового преобразователя для резервной СГЭЭ ЛА и проведены физические эксперименты.

4. Изготовлены, испытаны на борту летательных аппаратов конструктивные образцы полупроводникового преобразователя резервной системы генерирования электрической энергии.

5. Разработана инженерная методика расчета основных конструктивных параметров полупроводникового преобразователя для СГЭЭ ЛА.

6. Организован промышленный выпуск резервных полупроводниковых преобразователей для резервной СГЭЭ ЛА.

### **Методы исследования**

В работе использованы методы теории систем автоматического управления, теории линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами, численные методы решения систем дифференциальных уравнений, матричного исчисления, имитационное моделирование в программных пакетах MATLAB и Solid Works Flow, а также результаты физических экспериментов.

**Достоверность** полученных результатов подтверждаются корректной постановкой задач, адекватностью применения математического аппарата, а также результатами имитационного моделирования и физического эксперимента.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Разработаны, исследованы и применены в промышленных образцах векторные алгоритмы управления инвертором напряжения с силовым LC фильтром в составе резервной системы СГЭЭ ЛА, обеспечивающие заданное качество генерируемой электрической энергии в статических и динамических режимах, а также защиту силовых цепей в режимах перегрузки.

2. В результатах теоретических и экспериментальных исследования резервной СГЭЭ ЛА при работе на линейную и нелинейную симметричную и несимметричную нагрузку в статических и динамических режимах, а также при работе на импульсно-периодическую нагрузку.

3. Предложен блочно-модульный принцип построения полупроводникового преобразователя резервной СГЭЭ ЛА, позволяющий повысить рабочий ресурс и надежность работы системы, за счет снижения тепловых нагрузок на полупроводниковые элементы и селективного отключения силовых элементов.

### **Практическая значимость работы:**

1. Разработаны, изготовлены, проведены летные испытания, организован серийный выпуск полупроводниковых преобразователей, обеспечивающих режим выработки электрической энергии в режиме авторотации в составе резерв-

ных систем генерирования СГА-ОН, СГ-15, СГ-ПСПЧ-Д для самолетов ТУ-214ОН, ТУ-204СМ.

2. Предложены схемные решения полупроводникового преобразователя, позволяющие обеспечить их селективную защиту и отключение с возможностью сохранения ограниченной работоспособности.

3. Предложена инженерная методика расчета основных электрических и конструктивных параметров и элементов полупроводникового преобразователя, исходя из условия обеспечения заданного качества генерируемой энергии и массогабаритных параметров.

#### **Основные положения выносимые на защиты:**

1. Векторный алгоритм управления инвертором напряжения с силовым LC фильтром в составе резервной системы СГЭЭ ЛА, обеспечивающий заданное качество генерируемой электрической энергии в статических и динамических режимах.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований полупроводникового преобразователя в составе резервной СГЭЭ ЛА при работе на линейную и нелинейную симметричную и несимметричную нагрузку в статических и динамических режимах, а также при работе на импульсно-периодическую нагрузку.

3. Векторный способ управления полупроводниковым преобразователем для резервной СГЭЭ ЛА в режимах перегрузки, обеспечивающий защиту силовых цепей системы генерирования путем плавного перехода в режим тока ограничения в нагрузке.

4. Конструктивные решения при проектировании полупроводникового преобразователя для резервной СГЭЭ ЛА, позволяющие повысить рабочий ресурс и надежность работы системы, за счет снижения тепловых нагрузок на полупроводниковые элементы и селективного отключения силовых элементов.

#### **Внедрение результатов исследований**

Научные и практические результаты выполненного исследования были применены в ходе разработки и организации промышленного производства преобразователя системы резервной системы генерирования электрической энергии ПЧ-ПСПЧ-Д1 в рамках договора между ОАО «АКБ «Якорь» и ФГУП ПО «Север», а так же при серийном выпуске системы генерирования СГ-ПСПЧ-Д. (договор №64-13 от 28.08.2008).

При разработке преобразователей электрической энергии в рамках мероприятия по государственной поддержке развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, осуществляемого в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. №218 по государственному контракту от 22.10.2010 г. №13.G36.31.0010 на тему: «Исследование, разработка и организация промышленного производства механотронных систем для энергосберегающих технологий двойного назначения» шифр 2010-218-02-297.

## **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы были представлены в виде докладов и обсуждались на следующих мероприятиях.

- 4-ая международная конференция АПЭП-98. Новосибирск: НГТУ, 1998.
- Международная конференция Korus-99, Новосибирск: НГТУ 1999 г.
- Конференция «Информатика и проблемы телекоммуникации 99», Новосибирск: 1999 г.;
- 4th Korea - Russia International Symposium on Science and Technology. KORUS'2000. University of Ulsan, Republic of Korea, June 27-July 1, 2000;
- 5-ая международная конференция АПЭП-2000 Новосибирск 2000;
- 6-ая международная конференция АПЭП-2002 Новосибирск 2002;

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликована 12 печатных работ, в том числе две работы в журналах из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, а также получены 19 патентов РФ.

**Личный вклад автора** работы заключается в

- в работах, опубликованных в соавторстве с научным руководителем;
- в участии в постановке задач исследований;
- в разработке математических моделей резервной СГЭЭ ЛА и численных расчетах энергетических характеристик резервной СГЭЭ ЛА;
- в анализе и выборе оптимальной конструкции резервной СГЭЭ ЛА;
- в проведении и анализе результатов физических экспериментов;
- в разработке инженерной методики расчета основных конструктивных параметров преобразователя;

**Структура диссертации.** Диссертационная работа изложена на 129 страницах основного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 104 наименования и приложения. Содержит 58 рисунков и 11 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность, изложены цели и задачи диссертационной работы, методы решения поставленных задач. Описаны состав и структура работы, показана научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** проведен анализ современных требований к резервным системам генерирования летательных аппаратов. Приведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков основных структурных вариантов СГЭЭ ЛА, показана перспективность применения СГЭЭ ЛА переменного тока на базе МЭГ и инвертора напряжения. Выбрана оптимальная структурная схема силовой части резервной СГЭЭ ЛА, которая показана на рисунке 1.

Структурно резервная СГЭЭ ЛА состоит из двух связанных каналов генерирования левого и правого борта. В состав схемы входят два магнитоэлектрических генератора и два преобразователя, по одному комплекту на каждый борт, включенных для повышения надежности перекрестно. Магнитоэлектрический генератор каждого из каналов может одновременно работать как на канал левого, так и правого борта, этим достигается работоспособность СГЭЭ ЛА в полном объеме даже при выходе из строя одного из генераторов.

В состав каждого преобразователя СГЭЭ ЛА входят два канала : основной переменного тока 115В/400Гц номинальной мощностью 15кВА и канал постоянного тока, мощностью 3кВА, работающий при отказе двигателя и переводе его в режим авторотации, что обеспечивает получение электрической энергии даже при отключенном авиационном двигателе. Такое построение системы позволяет максимально использовать имеющиеся ресурсы для энергообеспечения ЛА, тем самым повышая его живучесть.

Выбор варианта построения входного выпрямителя проводился, с точки зрения массо-габаритных и экономических характеристик СГЭЭ ЛА. Наиболее оптимальным является применение управляемого тиристорного выпрямителя. С одной стороны он более дешевый и имеет меньшую массу и габариты, чем активный выпрямитель, с другой стороны он обеспечивает постоянство величины напряжения в звене постоянного тока, чего невозможно добиться применением неуправляемого выпрямителя, а это особенно важно, учитывая диапазон изменения входного напряжения.

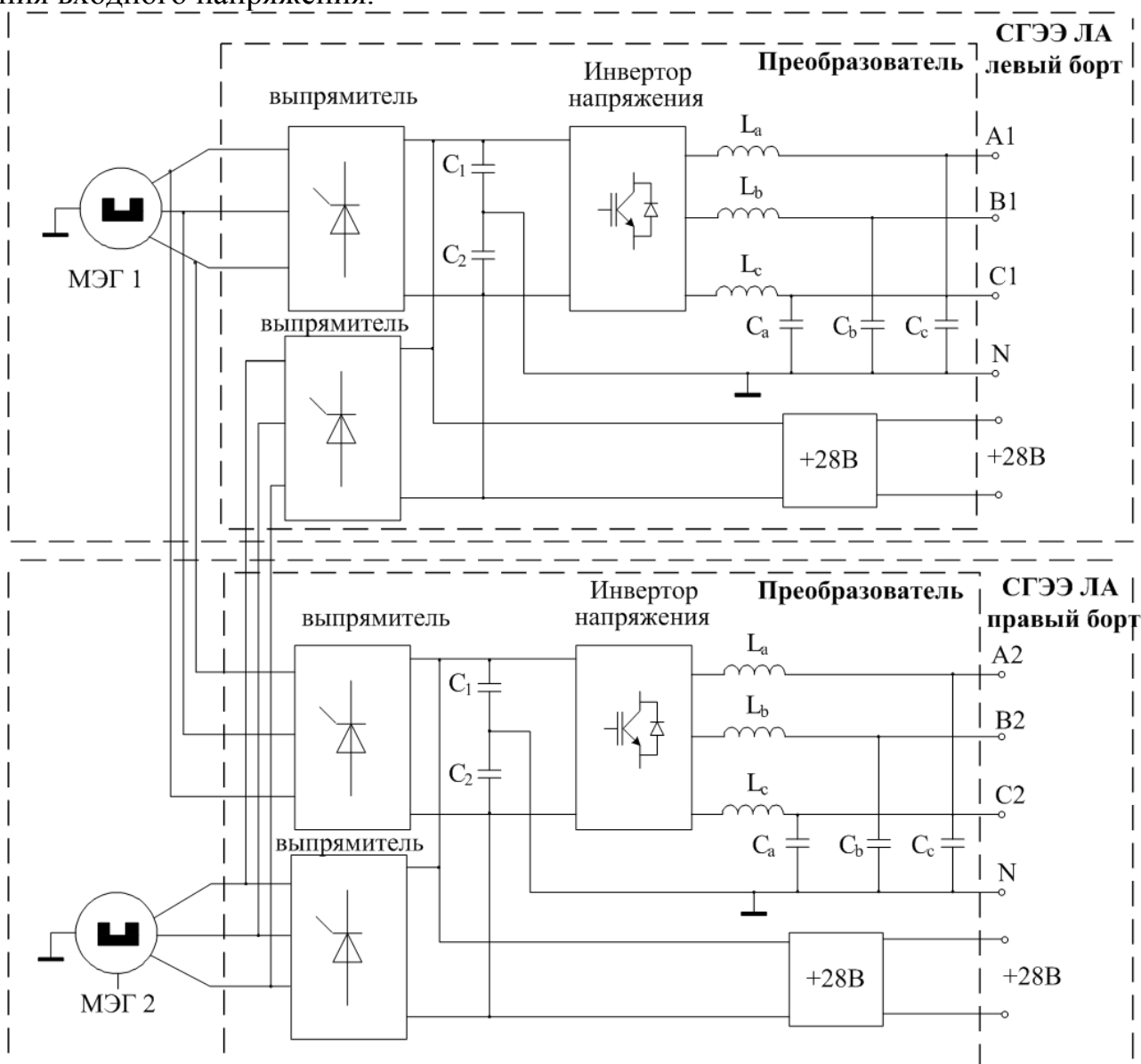


Рисунок 1- Структурная схема силовой части резервной СГЭЭ ЛА переменного тока на основе МЭГ



Для повышения качества выходного напряжения, улучшения параметров электромагнитной совместимости, а также с целью повышения надежности функционирования, инвертор напряжения можно реализовать в виде нескольких параллельных каналов, работающих со сдвигом опорных сигналов ШИМ на угол  $2\pi/m$ , где  $m$  – число параллельных каналов. Это позволяет снизить пульсации выходного напряжения, а также стоимость силовой схемы за счет применения менее мощных силовых ключей. Главной задачей при использовании параллельного включения является равномерное распределение мощности. Не идентичность распределения активной мощности нагрузки между "двумя соседними" каналами параллельных инверторов можно оценить с помощью следующего соотношения:

$$\delta_{\text{рн}} = \frac{P_{\text{нi}}^* - P_{\text{н(i+1)}}^*}{P_{\text{нi}}^* + P_{\text{н(i+1)}}^*} * 100\% \approx \frac{1}{4} \left( \frac{\pi}{m \cdot a_{\text{и}}} \right)^2 100\%$$

где:  $a_{\text{и}}$  - кратность частот;

$m$  – число параллельных каналов

График зависимости  $\delta_{\text{рн}}$  от кратности частот  $a_{\text{и}}$  для различных  $m$  приведен на рисунке 2. Из приведенного графика следует, что при  $a_{\text{и}} > 5$  и  $m = 4$  неточность в распределении активной мощности не превышает одного процента. Здесь

$$a_{\text{и}} = \omega_{\text{и}} / \Omega, \quad (1.1)$$

$\omega_{\text{и}}$  - частота ШИМ,  $\Omega$  - частота основной гармоники выходного напряжения инвертора.

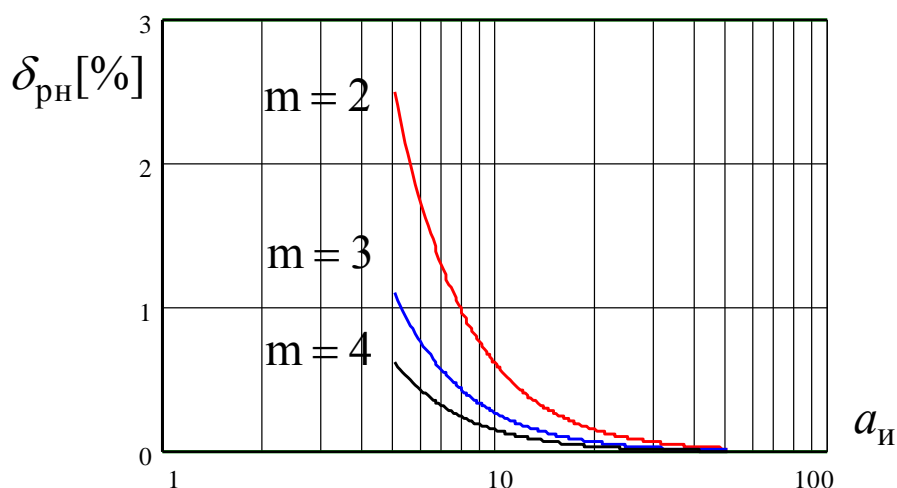


Рисунок 2- График зависимости не идентичности распределения активной мощности нагрузки между "двумя соседними" каналами от кратности частот

С учетом предложений по силовой части резервной СГЭЭ ЛА ее структурная схема приведена на рисунке 3.

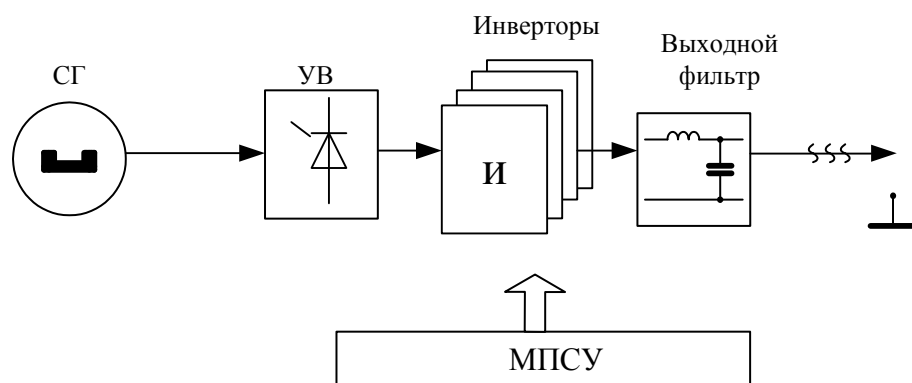


Рисунок 3-Структурная схема резервной СГЭЭ ЛА

Для выбора системы управления резервной СГЭЭ ЛА сформулированы следующие обязательные требования :

1. Обеспечение высокого качества выходного напряжения в соответствии с требованиями не хуже чем в ГОСТ Р 54073-2010;
2. Необходимость быстрого реагирования на изменения внешних факторов;
3. Устойчивость к возбуждающим факторам как к электрическим (перекосы фазного напряжения, нелинейная нагрузка и т.д.), так и механо-климатическим (тепло, холод, вибрация и т.д.);
4. Многовариантность алгоритма управления (для реагирования на возникающие аварийные ситуации);
5. Высокая контролепригодность, заключающаяся, в том числе в наличие внешнего интерфейса для обеспечения работы в общей информационной системе ЛА.

Обеспечить эти сложные и разносторонние требования возможно лишь с помощью применения современных микропроцессорных систем управления.

Систему управления (СУ) рассматриваемой резервной СГЭЭ ЛА, благодаря наличию звена постоянного тока можно разделить на две независимые части: СУ активного выпрямителя и СУ инвертора напряжения, параметрически связанные между собой через напряжение звена постоянного тока.

Различные аспекты работы СУ активного выпрямителя достаточно подробно исследованы в работах Харитонов С.А., Стенникова А.А., Берестова В.М. и т.д. Гораздо больший интерес представляют алгоритмы управления СУ инвертора напряжения. На сегодняшний день наиболее перспективным признаются алгоритмы управления, основанные на использовании обобщенного вектора напряжения с использованием вращающейся системы координат d,q. Основными преимуществами этого способа управления, является:

-возможность разделить управление по каналам активной и реактивной мощности;

-возможность добиться нулевой статической ошибки.

К недостаткам подобных систем, можно отнести:

-необходимость двойного преобразования координат, хотя при работе на симметричную нагрузку возможно использование, векторной ШИМ, которая не требует обратного преобразования в трехфазную систему координат.

На рисунке 4 представлена структурная схема микропроцессорной системы управления с использованием обобщенного вектора напряжения с вращающейся системы d,q координат, которая реализует сформулированные выше требования к резервной СГЭЭ ЛА. Система управления состоит из двух контуров управления соединенных по принципу подчиненного регулирования. Внутренний токовый контур, обеспечивает быстродействие системы. Внешний контур напряжения, обеспечивает качество регулирования выходного напряжения. Для формирования непосредственно сигналов управления силовыми ключами используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Все сигналы обратной связи по напряжению и току и сигналы задания преобразовываются в d,q координаты и регулирования идет в этих координатах. Для обеспечения оптимальных параметров выходного напряжения в контуре напряжения используются ПИ- регуляторы позволяющие минимизировать статическую ошибку.

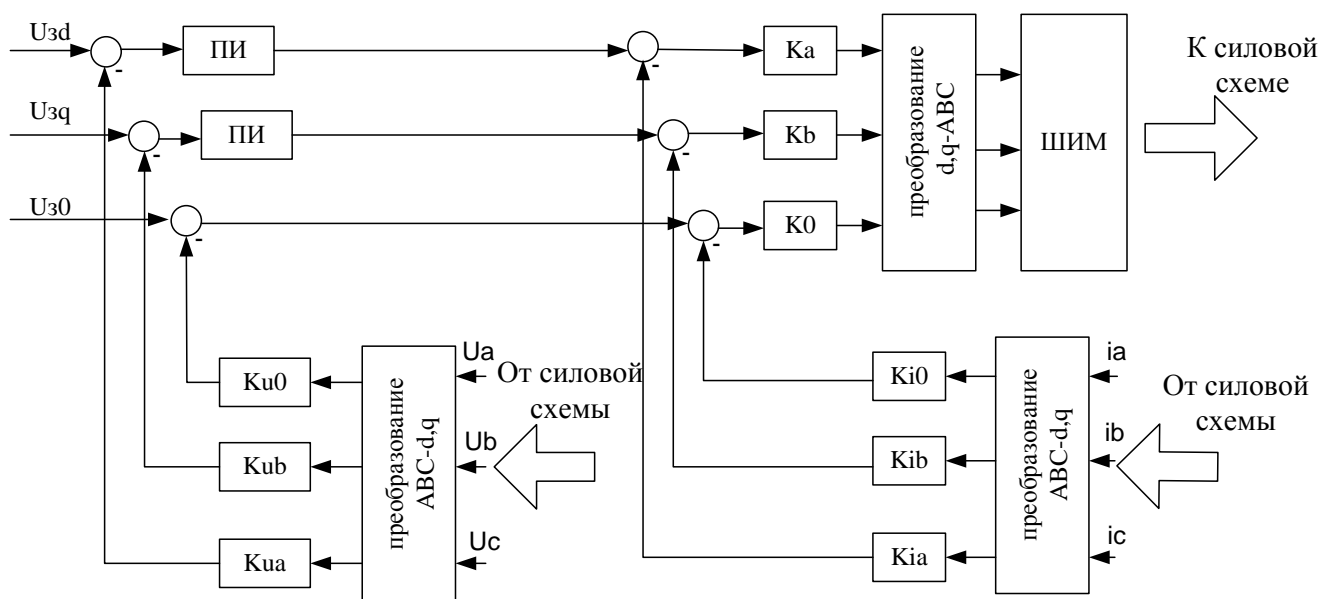


Рисунок 4- Структурная схема МПСУ

**Во второй главе** приводится описание математической модели резервной СГЭЭ ЛА с векторным алгоритмом управления на основе d,q- преобразования, обеспечивающей анализ электромагнитных процессов резервной СГЭЭ ЛА в различных режимах работы.

Математическая модель состоит из моделей синхронного генератора (СГ), неуправляемого выпрямителя, непосредственно силовой части, состоящей из четырех включенных последовательно мостовых инверторов и выходного L-C фильтра, блока микропроцессорной системы управления (МПСУ), блока нагрузок и измерительного блока. Звено постоянного тока, как и в реальном преобразователе распределенное и входит в состав инверторов. При разра-

ботке конструкции преобразователя подобный подход позволяет сократить занимаемый объем, а так же улучшить электромагнитные параметры за счет уменьшения длины связей инверторами и звеном постоянного тока. Кроме того, в состав инвертора входят распределенные индуктивности L-C фильтра, обеспечивающие совместную параллельную работу 4-х инверторов.

При создании математической модели резервной СГЭЭ ЛА сделан ряд допущений:

- синхронный генератор представлен в виде источника трехфазного напряжения с дополнительными индуктивностями;
- входной выпрямитель не управляемый, напряжение звена постоянного тока не регулируется;

Замещение полноценной модели синхронного генератора источником трехфазного напряжения с дополнительными индуктивностями сделано для упрощения математической модели. При этом необходимо выполнение следующих условий:

- магнитная система СГ не насыщена и линейна;
- момент инерции первичного двигателя достаточно велик и относительная скорость изменения его оборотов ( $\Omega$ ) ограничена и невелика, то есть:

$$\frac{1}{\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{dt} \ll 1.$$

- синхронный генератор явнополюсный и формирует 3-фазную систему выходных напряжений.
- в генераторе отсутствует система успокоительных (демпферных) контуров по продольной и поперечной осям.

Все эти условия в отношении резервной СГЭЭ ЛА выполняются.

Так же в во второй главе проведено моделирование поведения резервной СГЭЭ ЛА в режимах оговоренных требованиями ГОСТ Р 54073-2010, включая симметричные и несимметричные режимы нагрузки, работу на выпрямительную и импульсно-периодическую нагрузку, а также динамические режимы переключения нагрузки и показано, что во всех режимах работы выходное напряжения резервной СГЭЭ ЛА соответствует требованиям ГОСТ Р 54073-2010 и как по номинальным значениям так и по спектральному составу. Кроме того часть характеристик, например частота выходного напряжения имеет значительно лучше, чем предъявляемые требования.

**В третьей главе** приведены основные конструктивные требования к резервной СГЭЭ ЛА, рассмотрены различные варианты компоновки преобразователя СГЭЭ ЛА и выбран оптимальный с точки зрения массогабаритных показателей блочно-модульный вариант, показанный на рисунке 5.

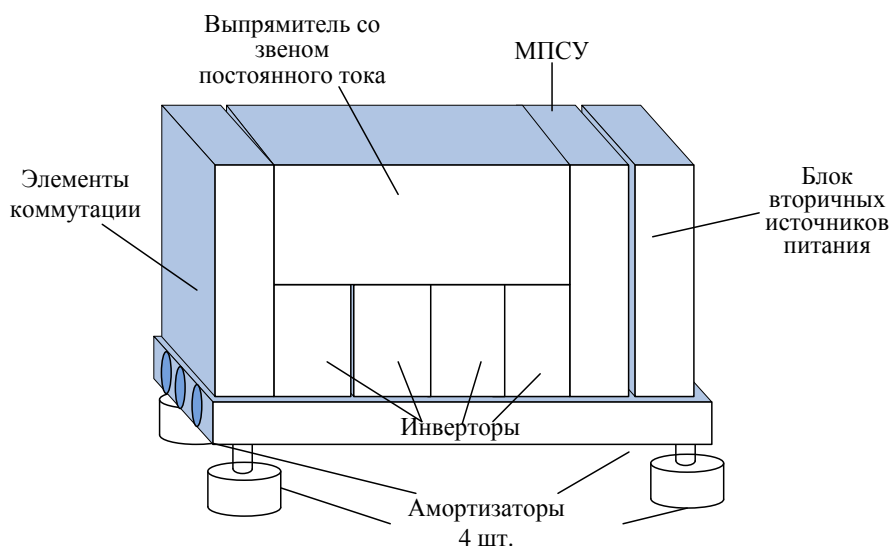


Рисунок 5-Вариант модульно-блочной компоновки

Рассмотрены варианты реализации защиты преобразователя в аварийных режимах работы. Предложена реализация варианта увеличения живучести преобразователя резервной СГЭЭ ЛА за счет применение защитных токоограничивающих элементов непосредственно в силовой схеме включения каждой инвертора, как показано на рисунке 6. В качестве защитного элемента могут использоваться, как стандартные предохранители, так и нестандартные элементы защиты. Наиболее компактным решением является создание защитного элемента непосредственно на печатной плате с использованием специальной конфигурации проводников. Подобный защитный элемент практически не занимает место на печатной плате, но обеспечивает необходимую защиту при возникновении короткого замыкания.

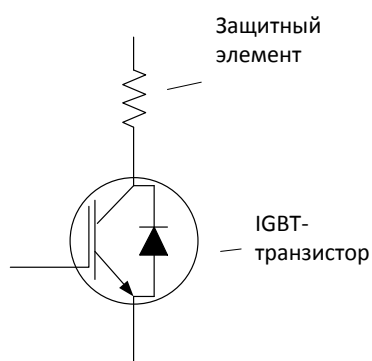


Рисунок 6- Применение защитного токоограничивающего элемента

Так же в третьей главе проведен тепловой анализ конструкции преобразователя и выбрана оптимальная с точки зрения массогабаритных показателей конфигурация радиатора охлаждения.

Для ориентировочной оценки требований к охлаждающим вентиляторам получена следующая зависимость расхода охлаждающего воздуха от выделяемой мощности и параметров охлаждающего воздуха:

$$L = \frac{W}{\rho \times C \times \Delta t}$$

где: W- мощность, отводимая воздушным потоком;

C- теплоемкость входного потока воздуха;

$\Delta t$ - разница температур входного и выходного потока воздуха.

L-расход воздуха м<sup>3</sup>/с;

$\rho$ -плотность воздуха

Проведенное моделирование и тепловой анализ выбранной конструкции охлаждающего радиатора в программе Solid Works Flow показала правильность проведенных расчетов.

**Четвертая глава** посвящена описанию физического эксперимента по экспериментальному подтверждению параметров резервной СГЭЭ ЛА. Эксперименты проводились на испытательном стенде Л2Ш396, разработанном и изготовленном на ФГУП ПО «Север» г. Новосибирск в рамках освоения промышленного производства преобразователей для систем генерирования СГ-ПСПЧ-Д.

В ходе экспериментальных работ было исследовано поведение изделия при работе в режимах определенных требованиями ГОСТ 54073-10. Проведенные исследования показали достаточно полное совпадение результатов моделирования и физического эксперимента, что доказывает правильность выбранной модели резервной СГЭЭ ЛА и подтверждает соответствие ее заданным требованиям.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы и даны рекомендации по их применению.

**Приложение** содержит инженерную методику расчета основных конструктивных параметров преобразователя резервной СГЭЭ ЛА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты теоретической и практической работы по решению важной научно-технической задачи повышения эффективности резервной системы генерирования электрической энергии переменного тока летательного аппарата состоят в следующем:

1. Определена оптимальная с точки зрения надежности и массогабаритных показателей структурная схема резервной СГЭЭ ЛА, на базе магнитоэлектрического генератора и инвертора напряжения. Схема состоит из двух магнитоэлектрических генераторов и двух преобразователей по одному комплекту на каждый борт, включенных для повышения надежности перекрестно. В состав преобразователя введен канал постоянного тока, работающий в режиме авторотации, что обеспечивает получение электрической энергии даже при отключенном авиационном двигателе.

2. Разработана математическая модель резервной СГЭЭ ЛА на базе магнитоэлектрического генератора и инвертора напряжения, построенного с использованием модульного принципа и системой управления с векторным алгоритмом.

3. Предложены алгоритмы управления, обеспечивающие необходимое качество генерируемой электрической энергии в статических и динамических режимах работы системы, а также алгоритмы обеспечивающие блокирование и выход системы из аварийных режимов.

4. Рассчитаны и проанализированы основные характеристики резервной СГЭЭ ЛА в различных режимах работы, показано, что предложенная СГЭЭ обеспечивает качественные параметры генерируемой электрической энергии на уровне мировых образцов авиационных систем электроснабжения.

5. Определена оптимальная конструкция полупроводникового преобразователя для резервной СГЭЭ ЛА, с точки зрения минимизации массогабаритных показателей и обеспечения заданной надежности. Проведен тепловой анализ выбранной конструкции, показавший, что при создании потока охлаждающего воздуха более  $210\text{ м}^3/\text{ч}$  температура полупроводниковых элементов не превышает максимально допустимую, а запас в 5-7% по температуре обеспечивает надежную работу изделия и минимизирует массогабаритные показатели.

6. Предложены способы реализации основных защит резервной СГЭЭ ЛА как конструктивные, так и программно-аппаратные, заключающиеся в применении защитных токоограничивающих элементов непосредственно в силовой схеме включения каждого из ключей инвертора и использовании в векторных алгоритмах управления токоограничения в элементах системы при нештатных режимах работы нагрузки.

7. Разработаны и изготовлены опытные образцы резервной СГЭЭ ЛА и проведены физические эксперименты, включая летные испытания, подтверждающие теоретические исследования, осуществлён запуск в серийное производство, изготовлено и поставлено на авиационные предприятия РФ более 20-ти систем.

8. Разработана инженерная методика расчета основных конструктивных параметров полупроводникового преобразователя для резервной СГЭЭ ЛА, позволяющая проектировать СГЭЭ ЛА с учетом режимов эксплуатации и минимальными запасами по массе и габаритам.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в изданиях из Перечня ВАК**

1. Симонов Б.Ф. Мехатронная система «синхронный генератор – трехфазный мостовой выпрямитель» для автономных энергетических систем/ Б.Ф.Симонов, С.А.Харитонов, В.В. Машинский // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.- ИГД СО РАН.-№3–С. 102-113

2. Коняхин С.Ф. Бортовая система генерирования электроэнергии постоянного тока повышенного напряжения на базе синхронного генератора и выпрямителя/ С.Ф. Коняхин, С.А. Харитонов, А.Н. Решетников, В.В. Машинский// Электроника и электрооборудование транспорта.- 2014.-№2 С. 15-18.

### **Другие научные публикации по теме диссертации**

1. Машинский В.В. Некоторые особенности конструктивного исполнения полупроводникового преобразователя частоты авиационной системы генерирова-

- ния/ В.В. Машинский, Д.В. Коробков, С.А. Харитонов, М.М. Юхнин, Э.Я. Лившиц // Технічна електродинаміка.-Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність.-часть 3.- сентябрь 2012 г.-С. 61-64
2. Kharitonov S.A. A control algorithm for voltage source converter in a system for generating ac power./S.A. Kharitonov, A.A. Stennikov, V.V. Mashinsky // The 4th Korea - Russia International Symposium on Science and Technology. KORUS'2000. University of Ulsan.-2000.-Part 2.- Electronics and Information Technology.-P.244-249.
3. Коробков Д.В. Механотронная система «синхронный генератор – трехфазный нулевой выпрямитель» в составе системы электроснабжения/ Д.В.Коробков, В.В. Машинский, С.А.Харитонов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність.- Київ.- часть 4.- 2012.- С.16-27.
4. Машинский В.В.. Математическая модель инвертора напряжения в составе автономной системы электроснабжения// Труды 6-ой международной конференции АПЭП-2002.-С.46-48;
5. Машинский В.В. Исследование устойчивости автономного инвертора напряжения с (АИН) в составе систем генерирования//Труды 5-ой международной конференции АПЭП-2000.-том 4.-С.124-126.
6. Машинский В.В. Микропроцессорные системы управления в системах генерирования электрической энергии./ В.В. Машинский // Сборник научных трудов.- Новосибирск: Изд-во НГТУ.-1999.- Вып. 4(17).- С.160.
7. Харитонов С.А. Алгоритм векторного управления инвертором с ШИМ для автономных систем генерирования переменного тока/ С.А. Харитонов, В.В. Машинский// Труды 4-ой международной конференции актуальные проблемы электронного приборостроения. Том 7 - Новосибирск 1998- С.74-76
8. Машинский В.В. Векторное управление на основе d,q-преобразования автономным инвертором с ШИМ для систем генерирования электрической энергии/ В.В. Машинский, С.А. Харитонов // Российская науч. тех. конф. "Информатика и проблемы телекоммуникаций" -Новосибирск 1999- С.50-51
9. Левин А.В. Результаты разработки системы генерирования электрической энергии типа «переменная скорость – постоянная частота» на базе синхронного генератора и инверторов напряжения./ А.В. Левин, М.М. Юхнин, Э.Я. Лившиц, С.А. Харитонов, Н.И. Бородин, Д.В. Коробков, М.А. Маслов, А.С. Харитонов, А.Ю. Храмов, В.В. Машинский // Силовая интеллектуальная электроника.- 2007.- №1.- С. 17-21.
10. Машинский В.В. Векторное управление инвертором на базе IGBT для систем генерирования электрической энергии переменного тока/ В.В. Машинский, С.А. Харитонов //Сборник научных трудов НГТУ -Новосибирск: Изд-во НГТУ.- 1998.-Вып.1 (10).- С.56-62.

### Патенты

1. Патент РФ №2509336 МПК G05F 1/00. Способ управления инвертором напряжения в составе системы генерирования электрической энергии переменного тока в режимах перегрузки/ Харитонов С.А., Коробков Д.В., Бачурин П.А.,



- Гейст А.В., Машинский В.В., Завертан С.Н., Воробьева С.В.; (RU) - №2011147428/08; заявл. 22.11.2011; опубл. 10.03.2014, Бюл. №7.
2. Патент РФ № 2144729 МПК 7H02M 5/27. Векторный способ управления преобразователем/ Харитонов С.А., Машинский В.В.; (RU) - №98114901/09; заявл. 29.07.98; опубл. 20.01.2000, Бюл. №2.
3. Патент РФ №2475914 МПК H02J 3/01. Способ повышения качества электрической энергии/ Харитонов С.А., Бородин Н.И., Лыкин А.В., Бородин Д.Н., Завертан С.Н., Машинский В.В.; (RU) - №2011128679/07; заявл. 11.07.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. №5.
4. Патент РФ №2513113 МПК H02J 3/26. Система генерирования электрической энергии трехфазного переменного тока с инвертором напряжения/ Харитонов С.А., Коробков Д.В., Машинский В.В., Завертан С.Н., Бачурин П.А., Гейст А.В., Макаров Д.В., Воробьева С.В.; (RU) - №2012125942/07; заявл. 21.06.2012; опубл. 20.04.2014, Бюл. №11.
5. Патент РФ № 122211 МПК H02J 3/02. Система генерирования электрической энергии трехфазного переменного тока/ Харитонов С.А., Макаров Д.В., Коробков Д.В., Машинский В.В., Завертан С.Н., Лучкин В.Ф., Чудновец С.П., Решетников А.Н. Гейст А.В. Бачурин П.А.; (RU) - №2012125952/07; заявл. 21.06.2012; опубл. 20.11.2014, Бюл. №32.
6. Патент РФ № 2472281 МПК H02M 7/17. Способ управления статическими стабилизированными источниками переменного напряжения, работающими параллельно на общую нагрузку/ Бородин Н.И., Харитонов С.А., Христолюбова А.И., Китапбаев А.М., Завертан С.Н., Машинский В.В.; (RU) - №2011128539/07; заявл. 08.07.2011; опубл. 10.01.2013, Бюл. №1.
7. Патент РФ № 2472269 МПК H02J 3/46. Способ управления статическими стабилизированными источниками переменного напряжения, работающими параллельно на общую нагрузку при ее несимметрии/ Бородин Н.И., Харитонов С.А., Коробков Д.В., Китапбаев А.М., Завертан С.Н.; (RU) - №2011128487/07; заявл. 08.07.2011; опубл. 10.01.2013, Бюл. №1.
8. Патент РФ № 121968 МПК H02J 3/16. Система генерирования стабильного напряжения трехфазного переменного тока с изменяющейся частотой/ Харитонов С.А., Макаров Д.В., Коробков Д.В., Машинский В.В., Завертан С.Н., Юхнин М.М.; (RU) - №2012125953/07, заявл. 21.06.2012; опубл. 10.11.2012, Бюл. №31.
9. Патент РФ № 121974 МПК H02P 9/44. Система генерирования стабильного напряжения переменного тока с изменяющейся частотой/ Харитонов С.А., Макаров Д.В., Коробков Д.В., Машинский В.В., Завертан С.Н.; (RU) - №2012125955/07, заявл. 21.06.2012; опубл. 10.11.2012, Бюл. №31.
10. Патент РФ № 121969 МПК H02P 9/00. Система стабилизации напряжения переменного тока/ Харитонов С.А., Машинский В.В., Завертан С.Н., Сапсалева А.В., Сыроватских В.В.; (RU) - №2012125954/07, заявл. 21.06.2012; опубл. 10.11.2012, Бюл. №31.
11. Патент РФ № 126660 МПК B60L 11/12. Стартер-генератор/ Харитонов С.А., Коробков Д.В., Машинский В.В., Завертан С. Н, Решетников А.Н., Преобра-

женский Е.Б.; (RU) - №2012142918/07, заявл. 08.10.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. №10.

12. Патент РФ № 2498475 МПК H02J 3/18. Способ управления устройством компенсации реактивной мощности в питающей сети/ Харитонов С.А., Коробков Д.В., Машинский В.В, Завертан С.Н., Бородин Н.И, Христюлова А.И., Бородин Д.Н.; (RU) - №2011149940/07, заявл. 07.12.2011; опубл. 10.11.2013, Бюл. №31.

13. Патент РФ № 2507668 МПК H02M 1/00. Интегрирующее устройство синхронизации/ Харитонов С.А., Коробков Д.В., Машинский В.В, Завертан С.Н., Макаров Д.В.; (RU) - №2012149657/07, заявл. 21.11.2012; опубл. 20.02.2014, Бюл. №5.

14. Патент РФ № 2515286 МПК H02M 7/00. Устройство синхронизации для систем электропитания с нулевым проводом/ Харитонов С.А., Коробков Д.В., Машинский В.В., Завертан С.Н, Бачурин П.А., Гейст А.В., Макаров Д.В.; (RU) - №2012149659/07, заявл. 21.11.2012; опубл. 10.05.2014, Бюл. №13.

15. Патент РФ № 2517298 МПК G05F 1/00. Способ управления инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией в составе системы генерирования электрической энергии переменного тока/ Харитонов С.А., Коробков Д.В., Машинский В.В., Завертан С.Н., Макаров Д.В., Гейст А.В., Воробьева С.В.; (RU) - №2011147429/08, заявл. 22.11.2011; опубл. 27.05.2014, Бюл. №15.

16. Патент РФ № 2517300 МПК G05F 1/625. Способ управления статическим преобразователем в системе генерирования электрической энергии переменного тока в режиме короткого замыкания/ Харитонов С.А., Коробков Д.В., Машинский В.В., Завертан С.Н., Бачурин П.А., Гейст А.В., Беспаленко О.Е., Воробьева С.В.; (RU) - №2011149941/08, заявл. 07.12.2011; опубл. 27.05.2014, Бюл. №15.

17. Патент РФ № 2522036 МПК G05F 1/625. Способ управления трехфазным инвертором напряжения со стабилизацией тока при переходе в режим перегрузки/ Харитонов С.А., Коробков Д.В., Машинский В.В., Завертан С.Н., Бачурин П.А.; (RU) - №2012126900/08, заявл. 27.06.2012; опубл. 10.07.2014, Бюл. №19.

18. Патент РФ № 2460194 МПК H02J 3/46. Способ управления статическим и стабилизированными источниками переменного напряжения, работающими параллельно на общую нагрузку при ее несимметрии/ Бородин Н.И., Харитонов С.А., Ковалев А.П., Коробков Д.В., Машинский В.В; (RU) - №2011100756/07, заявл. 12.01.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. №24.

19. Патент РФ № 122214 МПК H02M 7/5387. Z инвертор с нулевой точкой/ Харитонов С.А., Машинский В.В, Завертан С.Н., Макаров Д.В., Бачурин П.А.; (RU) - №2012126898/07, заявл. 27.06.2012; опубл. 20.11.2012, Бюл. №32.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
Государственного технического университета  
630073, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60 x 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 110 экз.  
Заказ 146. Подписано в печать 25.12.2014 г.