**Жораев Тимур Юлдашевич. Повышение качества электрической энергии бортовой системы генерирования на базе автономного инвертора напряжения : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03 / Жораев Тимур Юлдашевич; [Место защиты: Новосиб. гос. техн. ун-т].- Новосибирск, 2009.- 244 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/3484**

Государственное образовательное учреждение высшего профес­сионального образования «Новосибирский государственный техниче­ский университет»

04200940919





Жораев Тимур Юлдашевич

Повышение качества электрической энергии бортовой системы генерирования
на базе автономного инвертора напряжения.

Л

05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы
Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор Харитонов С. А.

Новосибирск - 2009

Список условных сокращений и стилистика, принятая в данной диссертации. Список условных сокращений:

АИН - автономный инвертор напряжения АИТ - автономный инвертор тока АВ - активный выпрямитель

БИХ — бесконечно-импульсная характеристика (цифрового фильтра)

ВСК - вращающаяся система координат

ВИТИМ — векторная широтно-импульсная модуляция

КИХ - конечно-импульсная характеристика (цифрового фильтра)

НПЧ — непосредственный преобразователь частоты ПИ - пропорционально-интегральный (регулятор)

ПР — пропорционально-резонансный (регулятор)

ПЧ - преобразователь частоты

ПФ - передаточная функция

САР — система'автоматического регулирования

СГЭЭ — система генерирования\* электрической энергии

СП - симметричная последовательность

ФФ - фазовращающий фильтр

ЦОС — цифровая обработка сигналов

ШИМ — широтно-импульсная модуляция

DSP - Digital Signal Processor: цифровой сигнальный процессор IPM - Intelligent Power Module: интеллектуальный силовой модуль

Принятые буквенные обозначения:

Постоянные величины обозначаются курсивом, начиная с заглавной буквы, например: *Кр, Uz=* 0.1. Переменные величины обозначаются малыми курсив­ными буквами: *а, Ь, х,р=*15. Векторные величины представлены жирными за­главными курсивными буквами, например: *S, С, Z.* Матрицы пишутся жирны­ми буквами без курсива, например: X, Z. Названия функций записываются ма­лыми буквами без курсива, например: f(r), g*(t),* s*(t).*

з

**ОГЛАВЛЕНИЕ.**

[ВВЕДЕНИЕ 5](#bookmark0)

СХЕМОТЕХНИКА И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СГЭЭ 16

1. Основные требования, предъявляемые к СГЭЭ 16
2. Схемотехника силовой части СГЭЭ 18
3. Алгоритмы управления АИН в составе СГЭЭ 27
4. Выводы к Главе 1 34
5. АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СГЭЭ 35

2.1 Разделение трёхфазной системы функций на симметричные последова­тельности 35

* 1. Математический аппарат для анализа электромагнитных процессов

в системе АИН-нагрузка в частотной области 41

* 1. Исследование замкнутой системы управления с

dq-преобразованием 55

* 1. Пропорционально-резонансное регулирование 85
	2. Режимы источника напряжения и источника тока 95
	3. Статическая компенсация мёртвого времени 105
	4. Динамическая,компенсация мёртвого времени 112
	5. Выводы к главе 2 121
1. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АИН В СОСТАВЕ CF33 123
2. Синтез фазовращающего звена для разделения последовательностей.. 123
3. Разложение на симметричные последовательности с использованием

фильтров 141

1. Замкнутая САР с использованием разделения последовательностей.... 146
2. Цифровой пропорционально-резонансный регулятор 157
3. Синтез цифрового фильтра для выделения основной гармоники 163
4. Выводы к Главе 3 169
5. ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ 171

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 184

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 187

ПРИЛОЖЕНИЯ 200

П1. Вывод основных выражений для dq-преобразования 200

П2. Вывод основных выражений для ар-преобразования 209

ПЗ. Обратные dq- и сф-преобразования 216

П4. Базовые свойства dq-преобразования 219

П5. Анализ ПР-регулятора в замкнутой САР 228

П6. Разложение на симметричные последовательности 231

П7. Симметричные последовательности в системе сфО 236

П8. Алгоритмы измерения частоты сигнала 242

**ВВЕДЕНИЕ**

Последние десятилетия в системах генерирования электрической энер­гии (СГЭЭ) переменного тока для автономных объектов наряду с синхронны­ми генераторами с электромагнитным возбуждением находят все более широ­кое применение синхронные генераторы с возбуждением от постоянных маг­нитов. В таких системах при изменении частоты вращения вала первичного двигателя изменяется частота и напряжение на выходе синхронного генерато­ра. Непосредственное использование напряжения генератора с изменяющими­ся параметрами сопряжено с трудностями, связанными с его трансформацией, выпрямлением на низких частотах, фазовой несимметрией ЭДС обмоток гене­ратора, «мягкостью» сети на зажимах генератора, межфазными наводками, синхронизацией, питанием электродвигателей.

Несмотря на то, что последние годы предпринимаются попытки созда­ния бортовой сети переменного тока с изменяющейся частотой и постоянной величиной амплитудного значения (например, Boeing - 787) доминирующими остаются системы постоянной частоты.

Требования поддержания заданных параметров электрической энергии в системах с синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов приводят к необходимости использования полупроводникового преобразова­теля частоты (ГТЧ). Силовая схема ПЧ и алгоритмы работы системы управле­ния определяются требованиями как общепринятых стандартов, так и требо­ваниями технического задания на конкретный летательный аппарат.

В качестве нагрузки на борту летательных аппаратов в последнее время используются сложные цифровые вычислительные комплексы, более точное и чувствительное оборудование. Эти потребители предъявляют соответствую­щие повышенные требования к качеству электроэнергии, выдаваемой СГЭЭ.

Появление новой элементной базы позволяет создавать системы генери­рования, которые по техническим характеристикам превосходят имеющиеся системы, построенные на основе механических и электромеханических- прин­ципов поддержания заданных показателей электроэнергии. Применение элек­тронных преобразователей позволяет увеличить надёжность и энергоэффек­тивность, СГЭЭ. Использование высокочастотного преобразования позволяет уменьшить, габариты, массу ПЧ; что является! одним из основных параметров при проектировании- бортовых систем. Современное развитие микропроцес­сорной техники позволяет расширить сервисные функции, благодаря^ которым потребитель может принять решение оперативнее и точнее. Например, исполь­зуя системы генерирования, с самодиагностикой\*, информативной индикацией, имеющей протоколирование режимов работы, обработку большого количества вариантов аварийных ситуаций, потребитель может скорее, находить неис­правности, быстрее выявлять дефектные узлы; проводить,анализ, нештатных ситуаций.

ПЧ' представляет собой\* совокупность включённых по определённой' си­ловой схеме полупроводниковых ключей, и» систему управления; формирую­щую дляних импульсы согласно.выбранным законам регулирования:

ПЧ по типу силовой схемы можно условно разделить,на несколько кате­горий, которые соотносятся\* с развитием, полупроводниковых технологий, и созданной\* элементной базой в течение нескольких десятков лет.

В частности, можно отметить следующие структурные схемы ПЧ [37]:

* с промежуточным звеном постоянного тока;
* с непосредственным преобразованием на базе тиристорного преобразователя частоты (циклоконверторы);
* матричные преобразователи (на базе полностью управляемых силовых ключей);
* модуляционного типа на базе полупроводникового

преобразователя. .

Эти структурные схемы могут быть представлены разнообразными схе­мотехническими решениями. Например, «выпрямитель — зависимый инвер­тор», «выпрямитель-инвертор», «активный выпрямитель-инвертор»^ матрич­ные преобразователи и др. Каждое из этих решений имеет перед другими:свои преимущества и недостатки по энергетическим характеристикам, массе и га­баритам, стоимости. На выбор схемы и алгоритмов управления ПЧ существен­ное влияние оказывает область применения СГЭЭ. Однако, последние годы определяющей тенденцией является использование схемотехнических' реше­ний ПЧша базе полностью управляемых приборов.

Такая схемотехника ПЧ наряду с применением новых поколений і микро­процессоров при построении СГЭЭ позволяет:

* полностью решить задачу согласования с нагрузкой при использо­вании бесколлекторных электрических машин переменного тока;
* значительно повысить качество генерируемой электрической энер­гии;
* уменьшить массу и габариты;
* обеспечивать сервисные функции для потребителя, в частности: контроль с использованием интерфейса с компьютером, монито­ринг системы, визуализация переменных состояния, информация с датчиков, защитные функции, программируемые режимы работы и т. д.
* создавать новые, ранее не реализуемые алгоритмы управления в виде программного обеспечения для микропроцессора или про­граммируемой логики.

Повышенные требования к качеству генерируемой энергии, выдвигае­мые потребителями электрической энергии ставят перед разработчиками СГЭЭ новые задачи, связанные с совершенствованием, как схемотехнических решений, так и алгоритмов управления.

Согласно нормативным документам под качеством электрической энер­гии понимают совокупность её потребительских свойств, обусловливающих нормальную работоспособность потребителей в соответствии с их назначени­ем [34]. Исторически для каждого этапа развития техники и бортового обору­дования существовал свой оптимальный комплекс требований к качеству электроэнергии. При этом количество нормируемых параметров и их уровень (качество) увеличивались по мере развития электрооборудования, повышения требований к потребителям со стороны обслуживаемых ими систем, и иссле­дований влияния отклонений тех или иных параметров от установленных для них значений на характеристики потребителей и источников.

До 1950 г. качество электроэнергии характеризовалось лишь допусти­мыми отклонениями напряжения и частоты от своих номинальных значений в установившемся режиме и формой кривой напряжения переменного тока. По­вышение требований к системам управления, автоматике силовой установки, пилотажно-навигационному оборудованию и радиоэлектронному оборудова­нию привело к возрастанию требований к качеству энергии, вырабатываемой бортовыми энергоузлами. Был проведён большой объём работ по согласова­нию требований потребителей; с возможностями создания требуемых СГЭЭ: неоправданное завышение требований к качеству всегда связано с дополни­тельными затратами, усложнением и утяжелением системы электроснабжения, а занижение - с ухудшением условий эксплуатации бортовой аппаратуры.

Результаты этих работ были обобщены вначале для самолётных и верто­лётных систем энергоснабжения в нормали 835АТ авиационной промышлен­ности, затем в ОСТ и, наконец, в ГОСТ 19705-74, ГОСТ 19705-81 и ГОСТ 19705-89 [11]. Зарубежные стандарты, регламентирующих качество электро­энергии бортовых систем приведены в нормативах MIL-STD-704 [76], MLL-STD-461 и MIL-STD-462 [75]. Для иных аппаратов существуют свои тре­бования к качеству электроэнергии, отражающие особенности их систем элек­троснабжения.

Предъявляемые требования к качеству электроэнергии могут быть обес­печены как схемотехническими, так и алгоритмическими способами. Из схе­мотехнических способов следует выделить использование различных схем включения силовых ключей, их типов (полууправляемые или полностью управляемые), использование -фильтрующих элементов. Алгоритмические способы представляют собой последовательность вычислений, по которым ра­ботает цифровая система управления преобразователем и обеспечивает задан­ные показатели качества электроэнергии

Одним из основных элементов современной СГЭЭ является автономный инвертор напряжения (АИН), как правило, с широтно-импульсной модуляцией (ТТТИМ). АИН находит применение в распространённой схеме СГЭЭ; постро­енной на базе активного выпрямителя (АВ) и инвертора, ввиду обеспечения этой системой двунаправленного потока энергии, возможности стартерного режима, обеспечения высоких показателей качества, как по току генератора так и по напряжению на нагрузке [190]. ПЧ с данной схемотехникой представ­ляет собой два инвертора напряжения, разделённых-накопительным элементом - ёмкостью звена постоянного тока. Пренебрегая, пульсациями напряжения в этом звене, инверторы могут быть представлены независимыми элементами. При этом, эффекты влияния мёртвого времени на искажения тока инвертора, несимметричность нагрузки/генератора приводящая к несимметрии напряже­ния, на ней, являются идентичными как для инвертора в обращённом\* режиме так и для обычного инвертора. Использование АИН с ШИМ в бортовых сис­темах генерирования электрической энергии с наличием нулевого провода и несимметричной нагрузкой создаёт научно-технические проблемы, некоторые из которых не в полной мере изучены, такие как:

* наличие высокочастотных пульсации в выходном напряжении из- за конечного значения элементов фильтра и наличия ШИМ;
* наличие эффекта «мёртвого» времени из-за конечного времени пе­реключения силовых элементов;
* нелинейность и неидентичность параметров силовых элементов

схемы.

Эти и другие факторы приводят к повышенному значению коэффициен­та нелинейных искажений, к увеличению коэффициента амплитудной модуля­ции, к повышению, уровня напряжения радиопомех, а также к появлению по­стоянной составляющей и нарушению симметрии выходных фаз. Всю сово­купность этих параметров, определенных требованиями ГОСТ 19705-89, а также ряд других, задаваемых конкретным техническим заданием на летатель­ный аппарат, можно объединить под одним термином, таким как электромаг­нитная совместимость СГЭЭ с нагрузкой.

При использовании большинства современных алгоритмов наличие дес­табилизирующих факторов со стороны нагрузки или алгоритма работы ПЧ приводит к нарушению электромагнитной совместимости в указанном смысле. Так, например, несимметричная нагрузка СГЭЭ с нулевым проводом, при ис­пользовании классических регуляторов во вращающейся системе координат (ВСК) dq, приводит к нарушению симметрии выходных напряжений в устано­вившемся режиме. В генерируемом напряжении появляются составляющие нулевой и обратной последовательностей [55,81].

Разработке специальных алгоритмов управления, позволяющих в значи­тельной степени уменьшить влияние нагрузки, особенностей схемы ПЧ на базе АМН, на выше перечисленные показатели качества генерируемой электриче­ской энергии посвящена настоящая диссертационная работа.

Целью **диссертационной работы** диссертационной работы является решение актуальной научно-технической задачи повышения качества выход­ного напряжения инвертора для статического режима работы в составе борто­вой системы генерирования электрической энергии путём разработки новых алгоритмов управления.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработаны алгоритмы управления инвертором напряжения с силовым LC фильтром и выводом нулевого провода, обеспечивающие улучшенное ка­чество электрической энергии в статических режимах работы СГЭЭ на несим­метричную нагрузку с компенсацией эффектов мёртвого времени и других возмущающих факторов.
2. Проведен параметрический синтез фильтров, реализующих предложен­ные алгоритмы в составе цифровой системы управления инвертором напряже­ния.
3. Разработаны математические модели системы инвертор - LC фильтр - нагрузка во временной и частотной областях, с привлечением математических аппаратов преобразования Лапласа, z-преобразования и,численного моделиро­вания.
4. Проведены математическое и физическое моделирование электромаг­нитных процессов в системе инвертор - LC фильтр - нагрузка с предложенны­ми алгоритмами управления.

**Методы исследования**

Поставленные задачи решались с привлечением математического аппа­рата преобразования Лапласа, Фурье, z-преобразования, дифференциального и интегрального исчислений, численного моделирования.

Достоверность результатов обеспечивалась корректностью расчетов и их сопоставлением с результатами физического эксперимента.

**Научная новизна** основных результатов диссертации заключается в следующем:

1. Предложены векторные и скалярные алгоритмы с использованием фазов­ращающих фильтров и пропорционально-резонансных регуляторов, реали­зующие замкнутую систему автоматического регулирования по симметрич­ным последовательностям выходного напряжения и тока системы генерирова­ния-электрической энергии с АИН, обеспечивающие астатическое регулирова­ние по основным гармоникам.
2. Предложен алгоритм компенсации гармоник в выходном напряжении системы генерирования электрической энергии с АИН, алгоритм реализо­вана помощью, каскада цифровых пропорционально-резонансных регуля­торов и обеспечивает компенсации влияншг эффекта «мёртвого\* времени» и других возмущающих факторов.

**Основные положения, выносимые на защиту**

1. Математическая линеаризованная^модель. АИН в-составе СГЭЭ с замкну­той системой управления, при использовании регуляторов во вращающей­ся системе координат, представленная как в операторной форме, так и в виде модели для численного моделирования (В среде Matlab-Simulink.

2: Алгоритм компенсации-симметричных составляющих выходного напря­жения АИН с\* нулевым проводом, основанный на применении синтезиро­ванного цифрового фильтра. Способ пофазного регулирования с исполь­зованием фазовращающих фильтров и ПР-регулирования. Способ, осуще­ствляющий переход из режима источника напряжения1 в режим источника тока и наоборот.

1. Алгоритм подавления гармоник, создаваемых в выходном'токе АИН из- за наличия эффекта «мёртвого» времени: с использованием каскада ПР- регуляторов, с введением дискретной производной тока инвертора.
2. Структуры, коэффициенты синтезированных цифровых фильтров для замкнутой системы АИН в составе СГЭЭ. Критерии синтеза, результаты анализа АЧХ и ФЧХ фильтров.
3. Использование синтезированных цифровых фильтров в составе замкну­той САР АИН. Результаты математического моделирования и физическо-

I

го эксперимента

**Практическая ценность работы ;**

1. Получены, передаточные: функции\* замкнутых систем1 автоматического

регулирования в составе СГЭЭ, учитывающие параметры, схемы инвертора, силового - фильтра и системы управления, что позволяет анализировать,устой­чивость системы и определять предельные параметры регуляторов, известными ; методами; ■

1. Предложен алгоритм разделения многофазного сигнала на: симметричные последовательности во временной области, что даёт возможность реализовать астатическое регулирование по\* симметричным составляющим: выходного, на­пряжения СГЭЭ'с использованием векторных, принципов. Принтом достигает­ся, симметрия: выходного \* напряжения: системы, генерирования; при: несиммет­ричной нагрузке; с нулевым проводом: .
2. Синтезированы коэффициенты цифрового/ фильтра, реализующего: резо­

нансный регулятор, применяемый\* в цифровой системе регулирования по основной; гармонике? и гармоникам; создаваемым эффектом «мёртвого; времени» и другими возмущающими факторами: ,

**Внедрение результатов работы.**

Результаты расчетов/токов?и напряжений? элементовшнвертора, разрабо­танная модель системы управления АИН использовались при разработке сис­темы генерирования электрической энергии мощностью 15/30 кВА для борто­вой системы электропитания летательных аппаратов: Работа; проводилась на кафедре Г1Э НГТУ в, рамках НИР-ОКР по договору с АКБ «Якорь» и ФГ УП ПО «Север»: Получен акт о применении результатов, полученных в ходе? ис­следований в изготавливаемой СГЭЭ, а также справка об использовании мате­риалов диссертации в учебном процессе, в частности, в курсе «Энергетическая электроника».

**Апробация работы.**

Основные результаты научно-исследовательских работ изложены 5 научно­практических конференциях ADM, APEIE, EDM:

1. 14-я международная научно-техническая конференция «Электроприво­ды переменного тока», г. Екатеринбург, 2007 г.
2. 7-я международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», г. Новосибирск, 2004 г.
3. 8-я международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», г. Новосибирск, 2006 г.
4. 25-я межрегиональная научно-техническая конференция «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных техниче­ских и информационных систем», г. Серпухов, 2006 г.
5. 6-я международная сибирская школа-семинар по электронным приборам и материалам EDM-2005, респ. Алтай, база «Эрлагол», 2005 г.

**Публикации:**

Основные результаты исследований опубликованы в 5 печатных работах,

из них одна работа - в ведущем рецензируемом научном журнале, 4 - в сбор­никах трудов и конференций:

1. Жораев Т.Ю. Методика синтеза ШИМ для автономных инверторов на­пряжения по заданному критерию качества выходного напряжения. / Ба- ховцев И.А., Жораев Т.Ю. // Тр. междунар. 14-й науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока». В 7 томах. Том 7. Силовая элек­троника и механотроника. Проектирование устройств автоматики и сис­тем управления. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. - С. 35-38.
2. Жораев Т. Ю. Математическое моделирование алгоритмов управления и электромагнитных процессов в СГПТ. / Жораев Т.Ю., Харитонов С. А. // Изд-во НГТУ, «Актуальные проблемы электронного приборостроения. 7-я международная конференция», 2004 г., т. 6. - С. 3-9.
3. Жораев Т. Ю. Поиск минимума разрядности ЦОС управления АИН при заданных показателях качества энергии. / Жораев Т. Ю., Хлебников А. С. // АПЭП-2006, VIII международная конференция. - С. 74.
4. Жораев Т.Ю., Обобщенный метод симметричных составляющих и мето­дика их выделения с помощью цифрового фазовращающего фильтра. / Жораев Т. Ю., Харитонов С.А. // Научный вестник НГТУ. №1(34), Но­восибирск, НГТУ, 2009. - С. 191-203
5. Zhoraev Т. J. A principle of Calculation Dynamic and static Power Losses with Hard-Switching IGBT. / Kharitonov S. A., Zhoraev T. J.// 6-th Interna­tional workshop. EDM-2005, session 11, July, pp. 147-149. [Метод вычис­ления динамических и статических потерь в преобразователе с IGBT.]

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованных источников, восьми приложений.

Общий объем 244 страниц машинописного текста, в том числе 199 стра­ниц основного текста, 65 рисунков, 4 таблицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проведённые исследования автономного инвертора напряжения с ну­левым проводом в составе СГЭЭ при работе на LC-фильтр с несимметричной нагрузой позволили получить в диссертационной работе следующие основные результаты.

1. Получена передаточная функция для dq-преобразования, с использо­ванием которой выведено выражение в операторной форме для выходного на­пряжения АИН в составе системы генерирования электрической энергии. Вы­ражение характеризует замкнутую систему регулирования «инвертор-LC- фильтр-нагрузка-регулятор» с использованием dq-преобразования. Получен­ная передаточная функция линеаризированной системы позволяет определить с использованием её полюсов область устойчивости замкнутой САР. Показа­но, что часть полученной передаточной функции dq-преобразования является пропорционально-резонансным регулятором.

Проведены исследования устойчивости замкнутой системы регулирова­ния, построены годографы при варьировании параметров силовой схемы и системы управления, а также определены области устойчивости, исходя из ог­раничений на значения полюсов передаточной функции.

Исследованы замкнутые САР с применением пропорционально­резонансного регулирования для компенсации гармоник в токе инвертора, соз­даваемых эффектом мёртвого времени. Предложены способы построения ре­гуляторов, обеспечивающие устойчивость работы при использовании выход­ного LC-фильтра.

Показано, что с применением пропорционально-резонансного регулиро­вания возможно подавление нулевой последовательности в выходном напря­жении системы генерирования при наличии нулевого провода. Рассмотрен способ построения систем с пофазным регулированием, который использует­ся для астатического управления однофазным инвертором.

1. Приведена методика разделения симметричных последовательно­стей, включающая способ разделения как в «АВС» так и в «аР» координатах. Показано, что реализация разделения последовательностей в «ар» координатах позволяет экономить вычислительные ресурсы.

Синтезирована замкнутая система регулирования по симметричным по­следовательностям АИН в составе СГЭЭ, при этом обеспечивается астатизм регулирования по прямой, обратной и нулевой последовательностям напряже­ния на нагрузке. Выполняются требования по симметрии напряжения нагрузки в широком диапазоне её изменения — от холостого хода до номинальной.

Представлен способ, использующий блок фазовращателя для пофазного регулирования с использованием dq-преобразования, и его применение для ас­татического управления однофазным инвертором.

Предложен алгоритм управления, позволяющий в аварийных режимах осуществлять независимый переход из режима источника напряжения в режим источника тока (и наоборот) дляютдельных фаз.

1. Синтезирован специальный цифровой фильтр, обеспечивающий требуемый поворот фазы сигнала на заданной частоте с заданной амплитудой. Структура фильтра и значения его коэффициентов легли в основу практиче­ской реализации системы управления' инвертором с раздельным регулирова­нием по симметричным последовательностям и пофазным регулированием с переходами режимов «источник напряжения - источник тока».

Реализован цифровой пропорционально-резонансный регулятор в одно­фазном варианте без использования арифметики комплексных чисел, что по­зволяет использовать этот регулятор для построения раздельного регулирова­ния по фазам, и, тем самым, обеспечить подавление симметричных компонент или гармоник в эффекте мёртвого времени. Выведены формулы для расчёта коэффициентов цифрового фильтра, которым является пропорционально­резонансный регулятор. Полученный цифровой фильтр использован в качестве элемента замкнутой системы управления по напряжению нагрузки. Показано, что использование цепи из нескольких ПР-регуляторов позволяет добиться подавления целого ряда гармоник, при этом обеспечивается устойчивость САР при работе с LC-фильтром.

Алгоритмы управления с использованием разделения последователь­ностей и пропорционально-резонансного регулирования как по основной гар­монике, так и по высокочастотным составляющим, были реализованы и апро­бированы на экспериментальном лабораторном образце. Экспериментально подтверждено обеспечение астатизма регулирования по прямой, обратной и нулевой последовательностям и подавление определённых гармоник, созда­ваемых эффектом мёртвого времени и другими возмущающими факторами.