

На правах рукописи



КУЛЬМАНОВ ВАСИЛИЙ ИГОРЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ
ИНВЕРТОРНОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ С ГЕНЕРАТОРОМ
ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

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

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре Автоматизированного электропривода ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Научный руководитель: **Анучин Алексей Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой Автоматизированного электропривода
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные
оппоненты: **Колганов Алексей Руфимович**
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой Электропривода и автоматизации
промышленных установок ФГБОУ ВО «ИГЭУ»

Томасов Валентин Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой Электротехники и прецизионных электромеханических систем ФГАОУ ВО «СПбНИУ ИТМО»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина»

Защита диссертации состоится «23» июня 2017 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, корпус М, ауд. М-606.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах) с подписями, заверенные печатью учреждения, просим отправлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д.14, Ученый Совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.157.02 к.т.н., доцент

Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Работа направлена на создание новой отечественной системы генерирования электроэнергии переменного тока 115 В, 400 Гц для воздушных судов (ВС) типа ПСПЧ (переменная скорость – постоянная частота) с применением современных технических решений в области схемотехники статических преобразователей частоты и систем управления.

Современное воздушное судно представляет собой сложную систему, состоящую из множества элементов. Главным первичным источником энергии в этой системе является авиационный двигатель. Элементы бортового оборудования ВС для своего функционирования требуют питания вторичной энергией различных типов: электрической, гидравлической, пневматической. Наиболее универсальной является электрическая энергия благодаря простоте ее получения, передачи и преобразования. Поэтому практически все оборудование современного воздушного судна в большей или меньшей степени электрифицировано. В процессе развития систем электроснабжения потребляемая электрическая мощность увеличилась с сотен ВА (самолет «Илья Муромец», 1913 г.) до сотен кВА (Ан 70) и, даже, до единиц МВА (Boeing 787, Boeing E-4B). Это связано как с увеличением суммарной мощности потребителей, так и с увеличением доли потребления электрической относительно других видов вторичной энергии. Появились воздушные суда, построенные по концепции самолета с повышенной степенью электрификации оборудования (т.н. more-electric aircraft в зарубежной литературе), где отбираемый от турбин воздух используется только для систем антиобледенения двигателей, а системы кондиционирования, поддержания давления в салоне, антиобледенения крыльев, являвшиеся традиционно пневматическими нагрузками, питаются электроэнергией. Некоторые гидравлические насосы в этих самолетах также заменены электрическими. Логическим продолжением такой концепции является самолет с полностью электрифицированным оборудованием (all-electric aircraft в зарубежной литературе).

Повышение энергоемкости бортового электрооборудования, а также его требований к качеству электроэнергии делает актуальной задачу модернизации систем электроснабжения летательных аппаратов, повышения их надежности, КПД, снижения массы и улучшения прочих показателей.

Данная работа посвящена разработке перспективной системы генерирования электроэнергии на базе генератора переменной частоты вращения и преобразователя частоты, вырабатывающего энергию переменного тока стабильной частоты 400 Гц напряжением 115/200 В. Система электроснабжения переменного тока 115 В, 400 Гц широко распространена среди современных воздушных судов и является одной из наиболее перспективных.

Применение системы ПСПЧ (переменная скорость – постоянная частота) позволяет исключить наиболее ненадежный элемент схемы генерирования – привод постоянной частоты вращения (ППЧВ). Кроме того, преобразователь частоты позволит повысить качество вырабатываемой электроэнергии благодаря электронной системе регулирования с микропроцессорным управлением.

Таким образом, актуальность работы состоит в создании новой отечественной бортовой генерирующей установки типа ПСПЧ для улучшения технико-экономических показателей систем электроснабжения воздушных судов.

Проектирование генераторного агрегата выполняется научной группой Русакова А.М. (кафедра ЭКАОиЭТ «НИУ «МЭИ»); проектирование и производство преобразователя частоты – научной группой Острирова В.Н. (кафедра АЭП «НИУ «МЭИ», ООО "НПП ЦИКЛ+", г.Москва); проектирование микропроцессорных контроллеров и разработка системы управления – научной группой Козаченко В.Ф. (кафедра АЭП «НИУ «МЭИ», ООО "НПФ ВЕКТОР", г.Москва) при непосредственном участии автора.

Цель диссертационной работы: разработка инверторной микропроцессорной системы питания с генератором переменной частоты для воздушных судов с применением новых технических решений в области топологии статических преобразователей частоты и систем управления такими преобразователями.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

1. Выбор топологии силового преобразователя, рациональной для системы электроснабжения воздушного судна с учетом ожидаемых массогабаритных показателей.
2. Выбор структуры системы управления преобразователем частоты на основе компьютерного моделирования.
3. Разработка алгоритмов компенсации влияния нелинейностей инвертора и нелинейной нагрузки на гармонический состав выходного напряжения средствами системы управления.
4. Программно-аппаратная реализация системы управления с коррекцией гармонического состава и ее испытания в составе макетного образца преобразователя частоты.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались:

- теоретические основы электротехники;
- теория автоматического управления;
- математический анализ;
- методы численного моделирования (Simulink MATLAB);
- программирование на языке высокого уровня Си и языке ассемблера.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждена результатами моделирования и экспериментальных исследований на физических объектах с использованием оборудования ООО «НПФ ВЕКТОР» и ООО «НПП «ЦИКЛ+».

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Доказано, что рациональной с точки зрения массогабаритных показателей преобразователя, а также простоты его конструкции для преобразователя частоты системы электроснабжения воздушного судна является топология с тремя независимыми однофазными мостовыми инверторами и выходным синусным фильтром.

- Предложен алгоритм выборочной коррекции гармонического состава выходного напряжения преобразователя частоты с синусным фильтром средствами системы управления с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) в реальном времени.
- Ранее известный алгоритм самообучения (в иностранной литературе известен, как «Repetitive control») с последовательной и параллельной коррекцией объекта управления применен в дискретном виде к задаче регулирования и компенсации гармонических искажений выходного напряжения преобразователя частоты бортовой генерирующей установки воздушного судна.

Основные практические результаты диссертации:

- Реализована рациональная с точки зрения массогабаритных показателей топология преобразователя частоты и микроконтроллерной системы управления для систем электроснабжения воздушных судов типа ПСПЧ.
- Разработан контроллер и программное обеспечение системы управления с коррекцией гармонического состава выходного напряжения преобразователя частоты по разложению в ряд Фурье.
- Система управления с коррекцией гармонического состава по разложению выходного напряжения в ряд Фурье апробирована в ходе лабораторных испытаний на макетном образце преобразователя частоты.
- Ядро самообучающейся системы управления с последовательной и параллельной коррекцией реализовано программно на языке Си в блоке S-функции пакета MATLAB Simulink. На основе компьютерного моделирования доказана работоспособность самообучающейся системы управления.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на заседании кафедры «Автоматизированного электропривода» «НИУ «МЭИ», на международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.» (г. Харьков, 2013 г.), VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (г. Саранск, 2014 г.), XI Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи SIBCON-2015 (г. Омск, 2015 г.) и IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS'2016) (г. Пермь, 2016 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 4, включенных в базу Scopus, 1 – в издании, рекомендованном ВАК для публикации основных результатов диссертаций.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 34 пунктов и приложения. Содержание работы изложено на 194 страницах машинописного текста, включает 185 рисунков, 12 таблиц, 5 листингов и 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы.

В первой главе рассмотрены решения в области электроснабжения летательных аппаратов, широко применяемые в последние десятилетия. Рассмотр-

ны современные тенденции в развитии бортовых систем генерирования электроэнергии, многообразие их типов.

Описаны два возможных способа стабилизации частоты напряжения для систем электроснабжения (СЭС) переменного тока 115 В, 400 Гц: использование приводов постоянной частоты вращения и статических преобразователей частоты (т.н. системы ПСПЧ). Перечислены основные преимущества систем ПСПЧ перед СЭС на базе ППЧВ для организации сети переменного тока постоянной частоты.

Приведены примеры летательных аппаратов, на которых применяются системы ПСПЧ. Рассмотрены схемотехнические решения, применяемые в современных системах ПСПЧ, а также в аэродромных преобразователях частоты.

Предложены меры по оптимизации конструкции преобразователя частоты для снижения его массы и габаритов.

Сформулированы цели и задачи работы.

Во второй главе описывается общая структура силовой части генерирующей установки. Формирование четырехпроводной (с нулевым проводником) трехфазной сети переменного тока 115 В, 400 Гц производится преобразователем частоты, сети постоянного тока 27 В – DC/DC-преобразователем, питающимся от отдельной секции генератора или общего ЗПТ (в зависимости от конструкции генератора). Описывается тип электрической машины, выбранной для применения в качестве генератора его разработчиками (индукторная машина с независимым электромагнитным возбуждением). Отмечается, что генератор может иметь различное число секций (независимых трехфазных обмоток для питания выпрямителей ПЧ и DC/DC-преобразователя). Количество секций генератора зависит от выбранной топологии силовой части. Индукторная машина сочетает в себе следующие важные преимущества: бесконтактность – отсутствие щеточных узлов, возможность регулирования потока возбуждения, простота и надежность конструкции, возможность работы при высоких частотах вращения благодаря отсутствию вращающихся обмоток и выпрямительных блоков на роторе. Недостатками такого типа являются повышенная масса из-за более низкой степени использования активных материалов, вызванной постоянством знака магнитного потока, более высокий, чем у синхронных генераторов, коэффициент искажения кривой напряжения и сравнительно большое изменение напряжения при изменении нагрузки. Отметим, что в данном случае качество выходного напряжения будет определяться преобразователем частоты, а изменение величины напряжения при изменении нагрузки можно компенсировать за счет управления возбуждением генератора.

Приводятся основные требования к генератору и его цепи возбуждения: достаточное быстродействие контура возбуждения для удовлетворения требований ГОСТ Р 54073 – 2010 по динамике переходных процессов при изменении нагрузки; для качественного управления генератором по цепи возбуждения должны быть предусмотрены конструктивные меры, исключающие возникновение в спинке статора вихревых токов при регулировании тока возбуждения; применение полумостовой схемы возбудителя для обеспечения как быстрого нарастания, так и быстрого спадания тока обмотки возбуждения.

Проводится сравнительный анализ различных вариантов топологии преобразователя частоты для сети переменного тока с нулевым проводником. Рассмотренные схемы ПЧ можно разделить на четыре основные группы (см. рис. 1): с трехфазным мостовым инвертором (рис. 1 «а»); с трехуровневым инвертором (рис. 1 «б»); матричный ПЧ (рис. 1 «в»); с тремя независимыми мостовыми инверторами (по одному на каждую фазу, рис. 1 «г»). Описываются их преимущества и недостатки, способы управления ключами, учет влияния «мертвого времени» на выходное напряжение преобразователя.

Наиболее перспективными для дальнейшего анализа, в первую очередь, с точки зрения массогабаритных показателей ПЧ, а также простоты конструкции и алгоритмов управления были определены две схемы: с тремя независимыми мостовыми инверторами (см. рис. 1 «г») и с трехуровневым инвертором (см. рис. 1 «б»). Одним из главных конкурентных преимуществ этих топологий является возможность работы в первом импульсном режиме ($+U, 0$) или ($-U, 0$) и удвоения частоты пульсаций напряжения на выходе инвертора относительно предельно допустимой частоты коммутации ключей, что позволяет уменьшить габариты выходного фильтра. В случае рис. 1 «г» это достигается за счет смещения сигналов управления ключами двух стоек мостового инвертора на 180° электрических градусов; в случае рис. 1 «б» – за счет повышения частоты ШИМ, что является допустимым для трехуровневого инвертора, т.к. каждый ключ в данной схеме коммутируется только на половине периодов ШИМ.

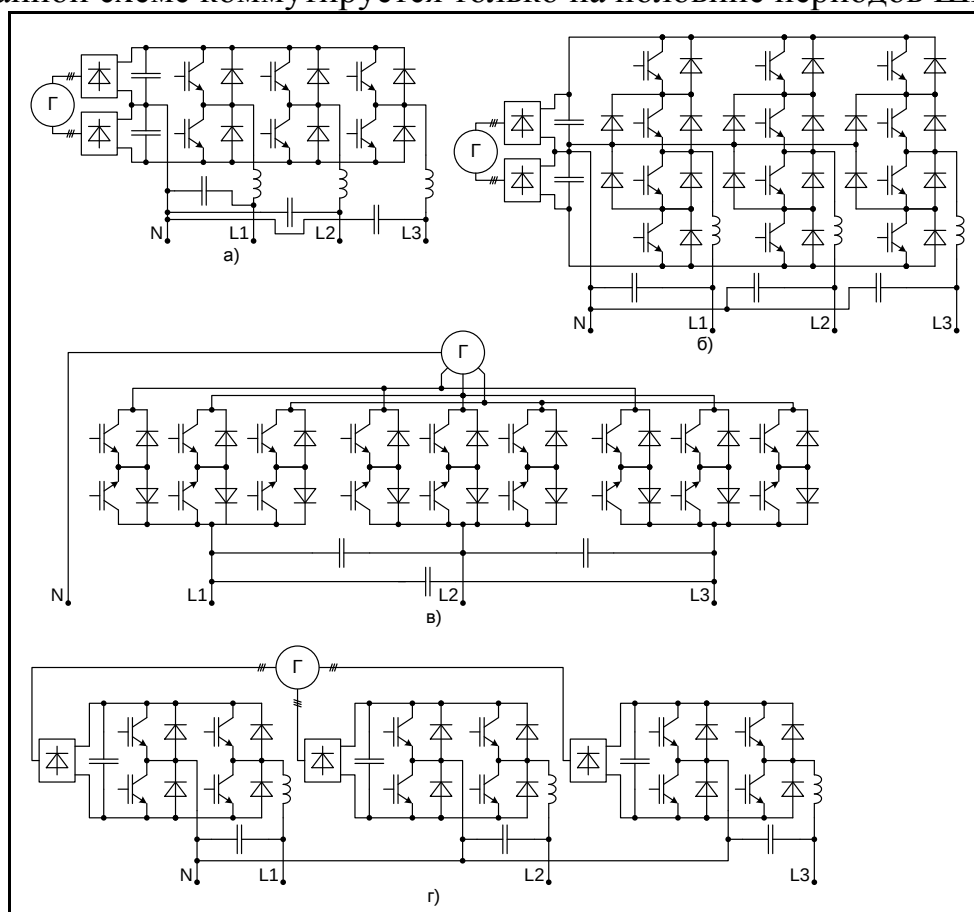


Рис. 1 Варианты топологии преобразователя частоты: а – ПЧ с мостовым инвертором и искусственной нулевой точкой; б – ПЧ с трехуровневым инвертором и гальванически развязанными ЗПТ; в – матричный ПЧ; г – ПЧ с тремя независимыми мостовыми инверторами

Рассматриваются вопросы согласования уровней напряжения генератора и ПЧ с учетом всех коэффициентов запаса: на падение напряжения в силовых ключах и элементах выходного фильтра, на изменение входного напряжения инвертора при изменении частоты вращения авиадвигателя и пр.

Описывается управление возбудителем и поддержание требуемого напряжения на звене постоянного тока, алгоритм стабилизации выходного напряжения инвертора при пульсациях напряжения ЗПТ. Система управления возбуждением генератора выполняется двухконтурной – с внутренним контуром тока возбуждения и внешним контуром поддержания напряжения ЗПТ. Автоматическая стабилизация выходного напряжения инвертора при пульсациях напряжения ЗПТ достигается благодаря расчету скважности ключей обратно пропорционально измеренному мгновенному значению напряжения ЗПТ.

Третья глава посвящена компьютерному моделированию преобразователя частоты. Моделирование производится в пакете MATLAB Simulink®.

В начале главы приводятся основные требования ГОСТ Р 54073 – 2010 к качеству напряжения и измерительные блоки, используемые в моделях для определения показателей качества.

На первом этапе описывается простая модель инвертора в виде инерционного звена (для схемы ПЧ с тремя однофазными инверторами) – рис. 2.

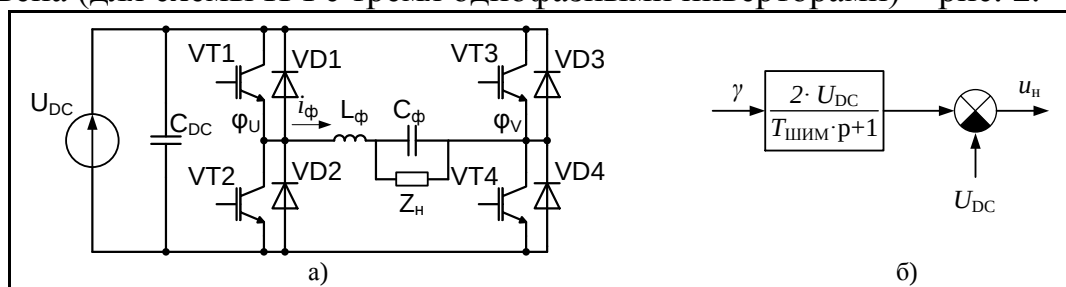


Рис. 2 Схема одной фазы инвертора с выходным фильтром и нагрузкой (а) и передаточная функция мостового инвертора в виде инерционного звена (б)

Для такой модели синтезируются регуляторы системы подчиненного регулирования с внутренним контуром тока и внешним контуром напряжения. Проверяется работа системы в опыте с плавным увеличением нагрузки. Система подчиненного регулирования при заданных параметрах выходного фильтра, диктующих коэффициенты регуляторов, не обеспечивает поддержания требуемого уровня напряжения. Рассматривается модификация системы подчиненного регулирования путем добавления предупредания в контур тока. Показана работа подчиненной системы с предупреданием в аналогичном опыте. Система подчиненного регулирования оказывается неработоспособна при заданных параметрах фильтра, т.к. при коэффициентах регулятора напряжения, диктуемых параметрами фильтра, она не выдает требуемого уровня напряжения под нагрузкой, а при увеличении коэффициентов возрастает колебательность системы.

Рассматривается работа системы релейного управления на той же модели ПЧ (с инерционным звеном в качестве инвертора). Демонстрируются сильные искажения выходного напряжения при частоте принятия решений релейным регулятором 160 кГц (рис. 3). Делается вывод о невозможности применения си-

стемы релейного регулирования при заданных параметрах выходного фильтра и быстродействии ключей из-за сильных искажений выходного напряжения.

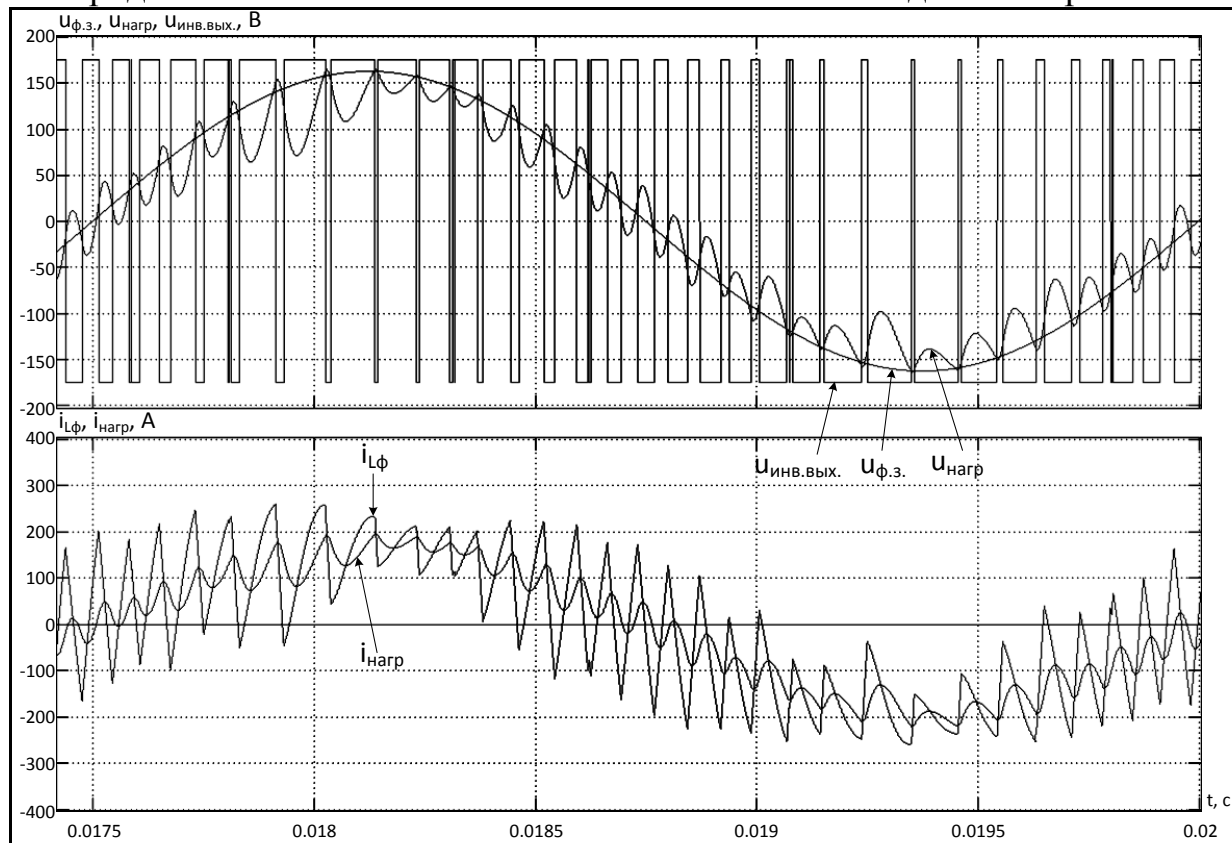


Рис. 3 Работа релейной системы управления (заданное фазное напряжение $u_{ф.з.}$, напряжение нагрузки $u_{нагр}$, выходное напряжение инвертора $u_{инв.вых.}$; ток нагрузки $i_{нагр}$ и ток дросселя фильтра $i_{Лф}$)

Рассматривается работа разомкнутой системы регулирования на простой модели ПЧ в виде экстраполятора нулевого порядка с дискретизацией по времени 50 мкс (частота ШИМ – 20 кГц).

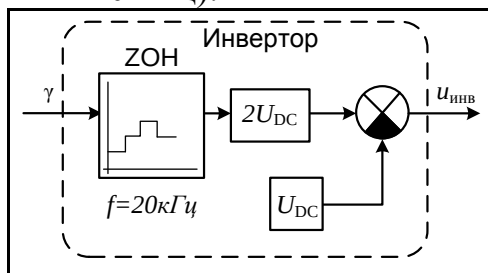


Рис. 4 Модель инвертора в виде экстраполятора нулевого порядка

Благодаря малому фазовому сдвигу и падению напряжения на элементах фильтра разомкнутая система обеспечивает хорошее качество выходного напряжения. При номинальной нагрузке значение напряжения укладывается в требования ГОСТ (амплитуда составляет 155 В при допустимом диапазоне 153..167 В). Для разомкнутой системы предлагается алгоритм релейного токоограничения: при повышении показания с датчика выше 150 А (при номинальном амплитудном токе 123 А) производится перевод инвертора в состояние нулевого напряжения. При превышении показаний датчика выше 200 А производится включение инвертора обратной полярностью. Исследуется работа токоограничения, подтверждается допустимость использования такого алгоритма.

Разомкнутая система управления с токоограничением принимается в качестве базовой для дальнейших экспериментов.

Проводятся эксперименты по оценке показателей качества выходного напряжения в различных режимах работы. Производится пошаговое уточнение модели, сначала путем представлением инвертора в виде широтно-импульсного генератора, а затем путем моделирования силовой части блоками библиотеки SimPowerSystem (блоки силовой электроники, источники напряжения, пассивные элементы электрических цепей и пр.).

На такой модели более детально рассматриваются различные режимы работы силовых ключей и генератора, оценивается влияние нелинейностей инвертора для преобразователя частоты мощностью 30 кВА. На уточненной модели становится очевидным существенное влияние нелинейностей инвертора на гармонический состав выходного напряжения, чего не было видно на более простых моделях: коэффициент гармонических искажений (КГИ) на холостом ходу составил 8% при «мертвом времени» 2,5 мкс (см. рис. 5). Допустимое значение КГИ при линейной нагрузке – 5%. Делается вывод о необходимости компенсации влияния «мертвого времени». Как один из возможных способов решения данной проблемы средствами системы управления, предлагается алгоритм компенсации по измеренному на предыдущем периоде ШИМ выходному напряжению инвертора.

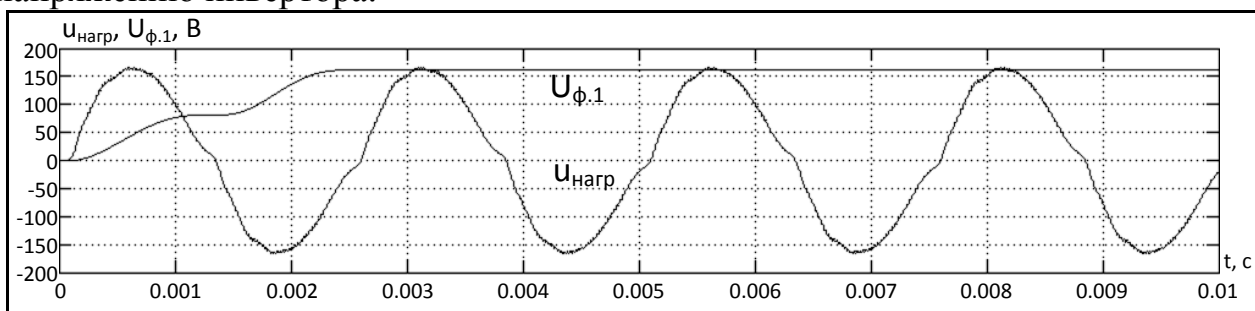


Рис. 5 Влияние нелинейностей инвертора (при величине «мертвого времени» 2,5 мкс) на форму выходного напряжения ПЧ, холостой ход (выходное напряжение $u_{\text{нагр}}$, амплитуда первой гармоники $U_{\phi.1}$)

Производится моделирование альтернативной топологии – многоуровневого инвертора с разомкнутой системой управления – с использованием библиотеки SimPowerSystem в аналогичных режимах работы. Здесь для управления ключами используется синусоидальная ШИМ.

Производится сравнение преимуществ и недостатков всех рассмотренных вариантов топологии ПЧ с точки зрения массогабаритных показателей (данные по массе основных элементов предоставлены разработчиками преобразователя). По совокупности «плюсов» и «минусов» в качестве наиболее перспективной для реализации выбирается топология преобразователя частоты на базе трех независимых однофазных инверторов. Ее главными преимуществами являются наименьшая масса выходного фильтра за счет работы в первом импульсном режиме с удвоением частоты пульсаций напряжения на выходе инвертора и простота конструкции ПЧ, а основным недостатком – пульсирующая загрузка генератора из-за невозможности обмена энергией между фазами ПЧ (рис. 6). Второй по значимости топологией определяется модифицированная схема ПЧ с трехуровневым инвертором, тремя секциями генератора, питающими общее

звено постоянного тока и уравнивателем напряжений ЗПТ (рис. 7). Этот вариант имеет несколько худшие массогабаритные показатели за счет усложнения конструкции дополнительными диодами и уравнивателем напряжений ЗПТ, но более качественную загрузку генератора за счет общего звена постоянного тока. Вторым вариантом может быть реализован, если будет выявлено, что влияние пульсирующей нагрузки генератора приведет к возмущениям, сопровождающимся недопустимыми вибрациями корпуса генератора и шумами.

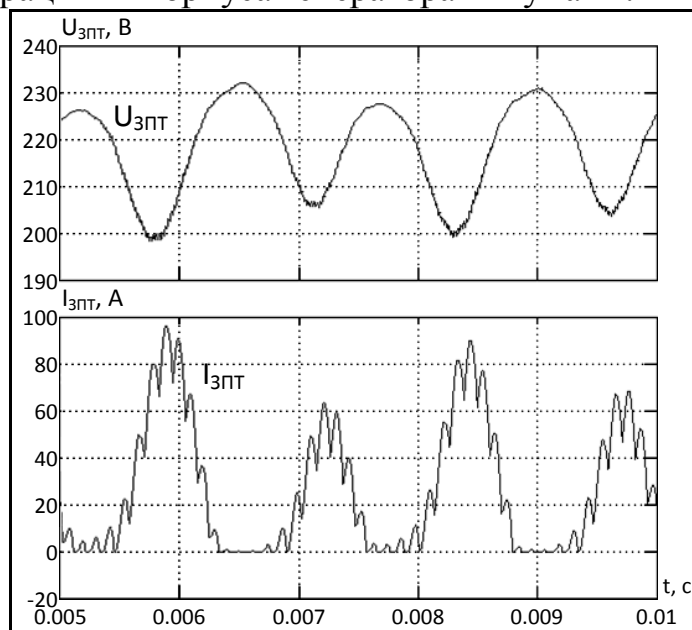


Рис. 6 Пульсирующая нагрузка генератора при индуктивно-резистивной нагрузке для схемы с тремя мостовыми инверторами (напряжение звена постоянного тока, выпрямленный ток генератора)

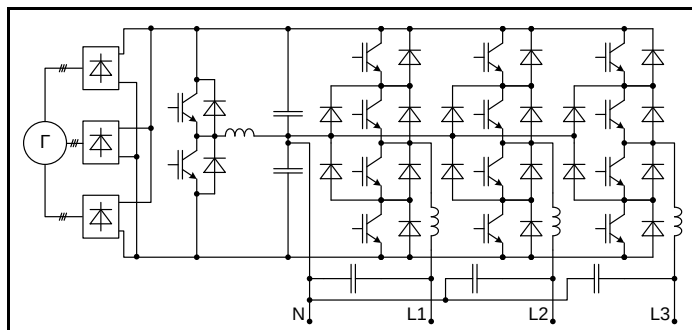


Рис. 7 Модифицированная топология ПЧ с трехуровневым инвертором и общим ЗПТ

Обзорно описывается конструкция проектируемого генератора для питания преобразователя частоты выбранной топологии мощностью 150 кВА.

Производится моделирование преобразователя частоты мощностью 150 кВА по схеме с тремя мостовыми инверторами с разомкнутой системой управления под нагрузкой. Оценивается влияние нелинейностей инвертора на гармонический состав выходного напряжения ПЧ, которое оказывается более выраженным, чем в ПЧ мощностью 30 кВА (топология и система управления ПЧ одинаковы для обоих вариантов мощности). Выявляется несоответствие коэффициента гармонических искажений требованиям ГОСТ (КГИ при номинальной нагрузке составил 12,5% при максимально допустимом по ГОСТ значении в 5%), делается вывод о необходимости компенсации влияния нелинейностей инвертора.

Предлагается алгоритм коррекции гармонических искажений выходного напряжения, вызванных, в том числе, влиянием нелинейностей инвертора и нелинейной нагрузки, основанный на разложении измеряемого напряжения нагрузки в ряд Фурье в реальном времени. Данный алгоритм реализуется исключительно средствами системы управления. Преобразование Фурье рассчитывается на целом периоде выходной частоты (400 Гц), выходные данные – амплитуды первой и ряда высших гармоник. Высшие гармоники представляются в виде амплитуды синусоидальной и косинусоидальной составляющей. Такое их представление более рационально для данной задачи, чем в виде амплитуды и угла, так как позволяет создать отдельные регуляторы, компенсирующие эти составляющие отдельно. В случае представления гармоник в виде амплитуды и угла невозможно точно определить поведение регулятора для амплитуды, так как задание нулевой амплитуды какой-либо гармоники точно недостижимо (из-за того, что при этом невозможно точно вычислить угол вектора, и ошибка в угле может привести к росту, а не подавлению гармоники). Амплитуды первой и высших гармоник поступают в качестве обратных связей на интегральные регуляторы. Используется 9 регуляторов: для первой гармоники и для синусоидальной и косинусоидальной составляющей 3, 5, 7 и 9 гармоник. Регуляторы обновляются один раз за период выходной частоты (400 Гц). Выходы регуляторов являются множителями для «единичного» управляющего воздействия по каждой гармонике. Т.е., каждый регулятор регулирует амплитуду своей гармоники, с которой она добавляется в задание напряжения для инвертора. Сумма опорных гармоник, домноженных на соответствующие выходы регуляторов, формирует управляющее воздействие для ключей инвертора.

В результате тестирования системы управления с коррекцией гармонического состава по данным преобразования Фурье (реализация блоками пакета MATLAB Simulink, с представлением гармоник в виде амплитуды и угла) на компьютерной модели преобразователя мощностью 150 кВА доказывалась ее работоспособность и перспективность для программной реализации на микроконтроллере в составе преобразователя частоты.

В четвертой главе описывается аппаратная часть системы управления преобразователем частоты для выбранной схемы (с тремя мостовыми инверторами). Приводятся основные параметры выбранного микроконтроллера.

Обосновывается использование для лабораторных испытаний стандартной платы сопряжения контроллера с силовыми ключами (плата драйверов) от производителя IGBT-модулей. Демонстрируется необходимость модификации стандартной схемы измерения температуры для улучшения точности в важном диапазоне температур. Обосновывается необходимость разработки собственной платы драйверов для преобразователя мощностью 150 кВА по условиям нагрева (материал стандартной платы не рассчитан на температуру, до которой нагреваются резисторы в цепях затворов IGBT). Приводится перечень входов и выходов контроллера для управления силовыми ключами инвертора, а также резервных – для управления возбудителем и DC/DC-преобразователем сети постоянного тока 27 В. Набор входов и выходов достаточен для данной задачи.

Перечисляются необходимые для измерения аналоговые величины: фазные токи и напряжения (по 3 входа), напряжения ЗПТ (3 входа), температуры стоек инвертора (6 входов). Описываются типы выбранных датчиков: терморезисторы для измерения температур ключей и датчики на эффекте Холла компенсационного типа для токов и напряжений. Описывается алгоритм выбора элементов измерительных цепей датчиков тока и напряжения. Приводится перечень аналоговых входов контроллера с указанием их формата. Контроллер обладает входами для приема аналоговых сигналов всех измеряемых величин.

В пятой главе рассматривается программная реализация основных алгоритмов управления инвертором преобразователя частоты.

Рассматривается применение дискретного преобразования Фурье (ДПФ) для выходного напряжения в реальном времени. Рассматривается принцип действия системы управления с подавлением высших гармоник на базе дискретного преобразования Фурье, дополненная релейным токоограничением (структурная схема представлена на рис. 8 для одной фазы. Управление каждым фазным инвертором производится независимо).

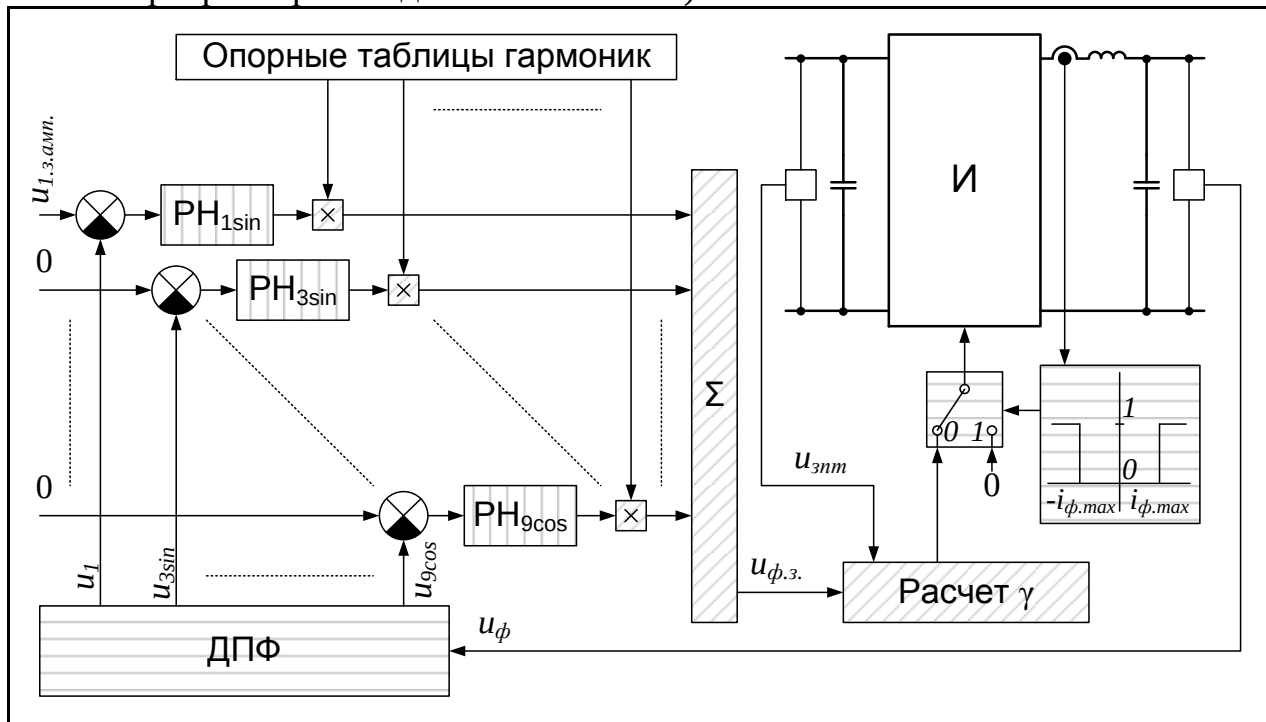


Рис. 8 Структурная схема системы управления инвертором с коррекцией гармонических искажений по разложению выходного напряжения в ряд Фурье (горизонтальной штриховкой отмечены блоки, рассчитываемые на частоте 102,4 кГц, диагональной – 25,6 кГц, вертикальной – 400 Гц)

В течение периода выходного напряжения производится расчет преобразования Фурье (4 раза на периоде ШИМ, 256 раз на периоде выходного напряжения). Полученные в конце периода выходного напряжения (частота расчета 400Гц) амплитуды гармоник поступают в качестве обратных связей на интегральные регуляторы напряжений (РН). Задание амплитуды первой гармоники равно ее номинальному значению, а всех высших – нулю (задача системы управления – скомпенсировать их). На выходах регуляторов получают коэффициенты, с которыми каждая гармоника будет добавлена в общее задание напряжения инвертора $u_{\phi.з.}$. Далее опорные табличные значения всех гармоник,

промасштабированные путем умножения на соответствующие коэффициенты, суммируются, формируя итоговое задание напряжения инвертора, по которому будет рассчитана скважность работы ключей γ (расчет на частоте ШИМ – 25,6 кГц). При расчете скважности производится дополнительная коррекция по напряжению ЗПТ $u_{зпт}$, исключая влияние возможных колебаний $u_{зпт}$ на $u_{ф}$.

Для реализации модуля токоограничения предусмотрен релейный блок отключения инвертора. Если ток через дроссель синусного фильтра превышает уставку токоограничения, ключи блокируются (размыкаются). Проверка условия ограничения тока и блокировка ключей в случае его выполнения производится на частоте 102,4 кГц, т.е. 4 раза за период ШИМ, асинхронно. Это позволяет оперативно отключить инвертор, например, на первой четверти периода ШИМ, не дожидаясь его окончания, и предотвратить дальнейшее нарастание тока. Разблокировка ключей и возвращение управления ими модулю ШИМ производится синхронно – в начале следующего периода ШИМ. Таким образом, исключается ситуация, когда за 1 период ШИМ в результате срабатывания и снятия токоограничения ключи коммутируются несколько раз, превышая допустимую частоту коммутаций. Блокировать и разблокировать ключи асинхронно несколько раз на одном периоде ШИМ недопустимо, т.к. в таком случае может быть превышена допустимая частота коммутации ключей.

Рассчитываются доступные вычислительные ресурсы микроконтроллера при условии работы системы в реальном времени. Предлагаются меры по оптимизации программного кода системы управления на базе ДПФ с целью уложиться в вычислительные мощности выбранного микроконтроллера.

Приводятся результаты испытаний работы системы управления на базе ДПФ в составе макетного образца ПЧ (по схеме рис. 1 «г») мощностью 30 кВА. Описывается процесс тестирования работоспособности алгоритма выборочного подавления высших гармоник путем включения компенсации каждой гармоники по отдельности, процесс настройки системы управления с целью компенсации запаздывания, складывающегося из времени сбора и обработки данных измерений в АЦП и времени отработки задания ключами инвертора. Настройка производится путем задания синусоидальной составляющей для одной высшей гармоники и подстройки фазового сдвига опорной кривой этой гармоники, чтобы на выходе ПЧ она также имела только синусоидальную составляющую. Приводятся результаты испытаний макетного образца под нагрузкой (см. рис. 9 – рис. 12). Оценивается соответствие полученных показателей качества вырабатываемой электроэнергии требованиям ГОСТ (допустимые по ГОСТ значения КГИ – 5% для номинальной линейной и 8% для нелинейной нагрузки мощностью 25% от номинальной). Делается вывод о полном соответствии качества регулирования предъявленным требованиям: амплитуда напряжения и КГИ для обоих типов нагрузки находятся в пределах допусков.

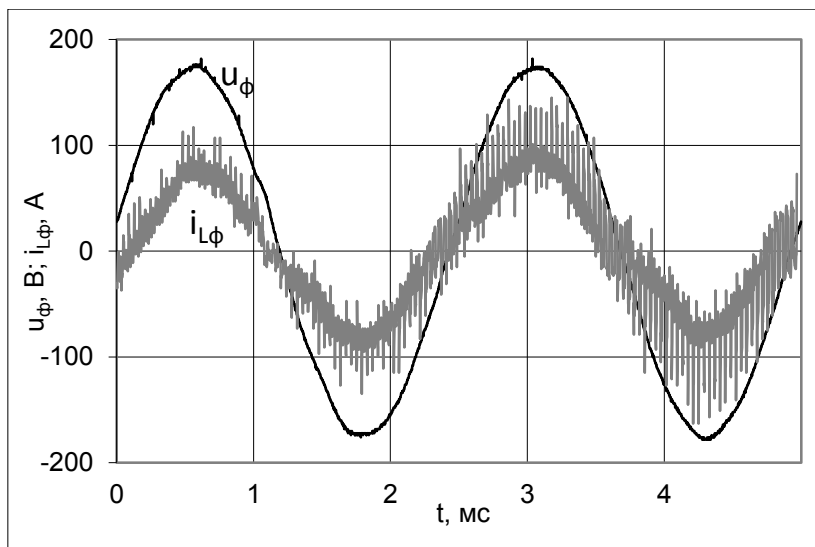


Рис. 9 Напряжение нагрузки и ток дросселя фильтра (нагрузка активная, линейная).

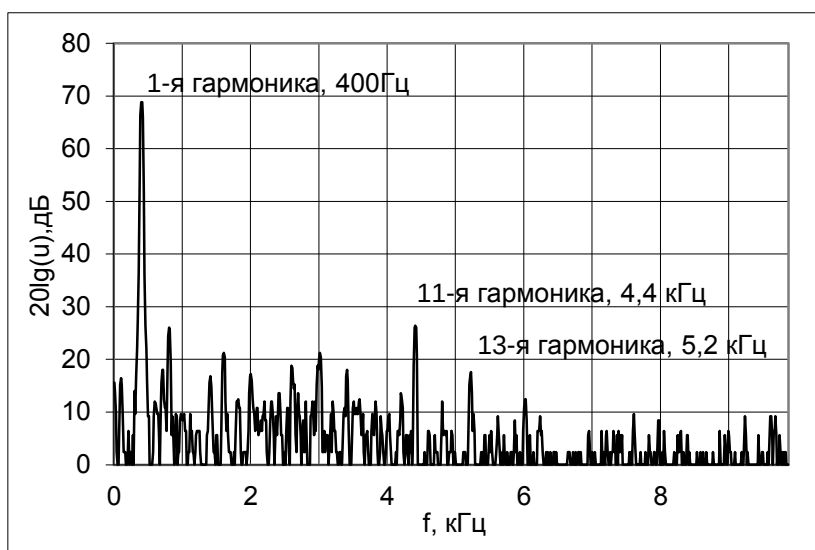


Рис. 10 Спектр напряжения при линейной нагрузке (КГИ около 1%)

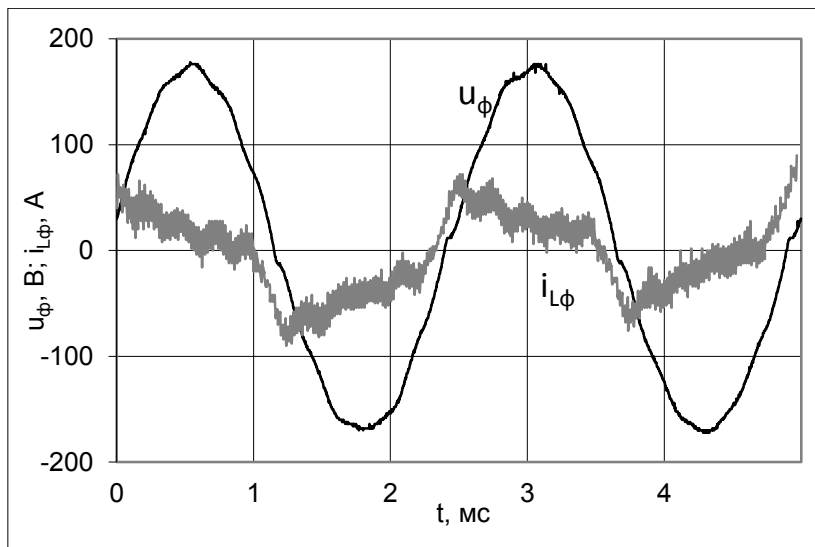


Рис. 11 Напряжение нагрузки и ток дросселя фильтра (нагрузка нелинейная)

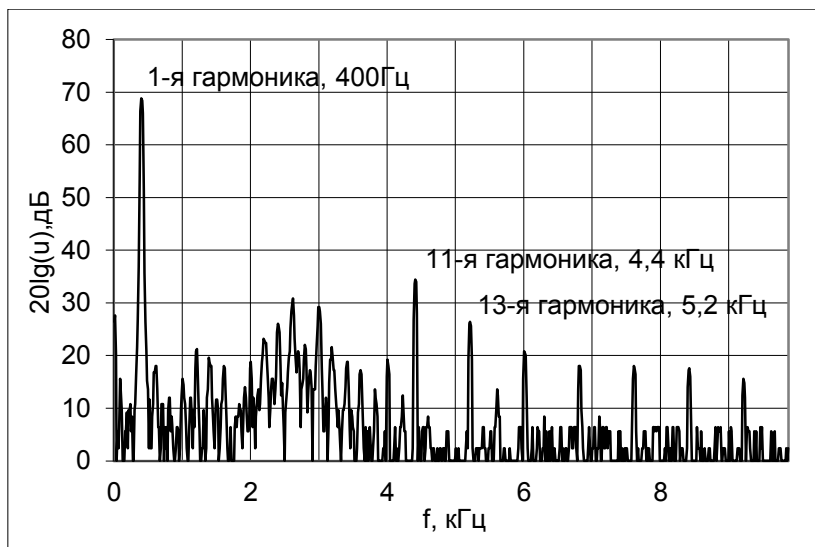


Рис. 12 Спектр напряжения при нелинейной нагрузке (КГИ около 2%)

В главе рассматривается и предлагается модификация системы управления путем использования альтернативного – самообучающегося – алгоритма для подавления высших гармоник. Показаны преимущества самообучающейся системы управления по сравнению с реализованной системой на базе ДПФ: значительно меньшая требовательность к вычислительным ресурсам и подавление всех высших гармоник напряжения, теоретически, с частотами до 51,2 кГц, в отличие от выборочного подавления заданного ряда гармоник в системе с ДПФ. Дан принцип действия специального регулятора – периодического интегратора (Р-интегратора), лежащего в основе самообучающейся системы управления, и его реализация в дискретном виде. Здесь измеренное выходное напряжение в каждой точке (т.е., на каждом периоде ШИМ внутри периода основной гармоники) сравнивается с заданным выходным напряжением в этой же точке. Если в i -той точке текущего периода заданное выходное напряжение оказывается больше измеренного, то на следующем периоде нужно в этой же точке увеличить задание для инвертора и наоборот.

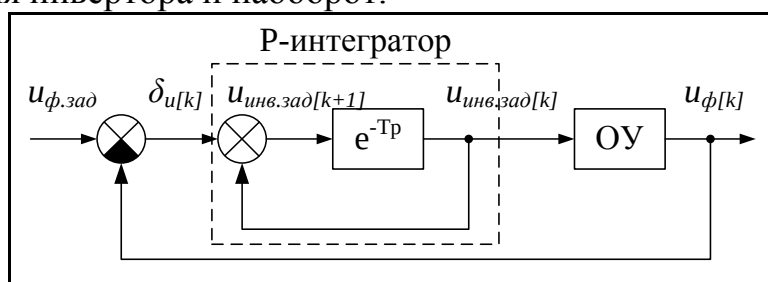


Рис. 13 Структура самообучающейся системы регулирования на базе Р-интегратора ($u_{ф.зад}$ – заданное фазное напряжение, δ_u – ошибка по напряжению на k -том периоде напряжения, $u_{инв.зад}$ – заданное напряжение инвертора на периоде k и $k+1$, $u_{ф}$ – измеренное фазное напряжение на k -том периоде, T – период выходного напряжения)

Исследуется работа самообучающейся системы управления на модели преобразователя частоты мощностью 150 кВА. Выявляется проблема расхождения процесса самообучения из-за запаздывания в тракте измерения аналоговых сигналов и в отработке инвертором приложенного задания. Рассматривается программная реализация последовательной упреждающей коррекции путем

расщепления звена запаздывания Р-интегратора, призванной решить эту проблему. Суть ее реализации в следующем: заданием напряжения для инвертора на текущем k -том периоде в i -той точке служит выход интегратора под номером $i+n$ (n – упреждение, задаваемое в периодах ШИМ) – см. рис. 14.

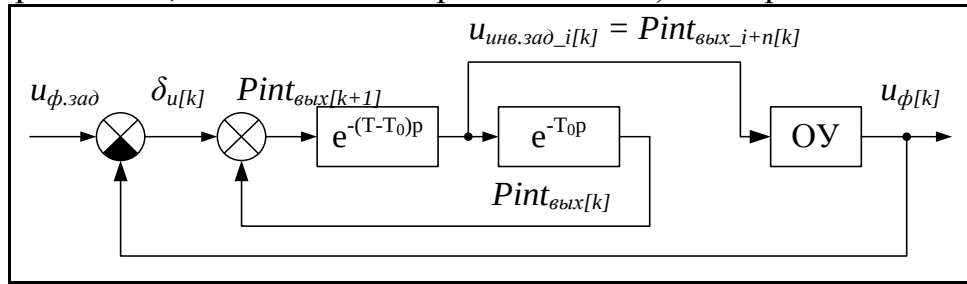


Рис. 14 Структура самообучающейся системы регулирования с упреждающей коррекцией ($Pint_{\text{вых}}$ – выход Р-интегратора, $u_{\text{инв.зад}_i}$ – задание напряжения инвертора в i -той точке, $Pint_{\text{вых}_{i+n}}$ – выход Р-интегратора в точке $i+n$, T_0 – величина упреждения)

Выявляется проблема расхождения процесса самообучения в высокочастотной области. Производится вывод разностных уравнений фильтра, применяемого для параллельной коррекции объекта самообучения в высокочастотной области. Описывается программная реализация самообучающейся системы с упреждающей и параллельной коррекцией (рис. 15). Суть работы параллельной коррекции можно объяснить так. Без нее выход регулятора в i -той точке на следующем периоде основной гармоники складывается из ошибки в i -той точке на текущем периоде и выхода регулятора в i -той точке на текущем периоде. А с коррекцией выход регулятора в i -той точке на следующем периоде складывается из ошибки в i -той точке на текущем периоде, выхода регулятора в i -той точке на текущем периоде и выходов регулятора в двух соседних точках: $(i-n)$ -той и $(i+n)$ -той на текущем периоде. Причем, выходы регуляторов добавляются с весовыми коэффициентами. К примеру, при $K_{\phi}=8$ весовой коэффициент для выхода в i -той точке будет равен 80%, а для двух соседних – по 10%.

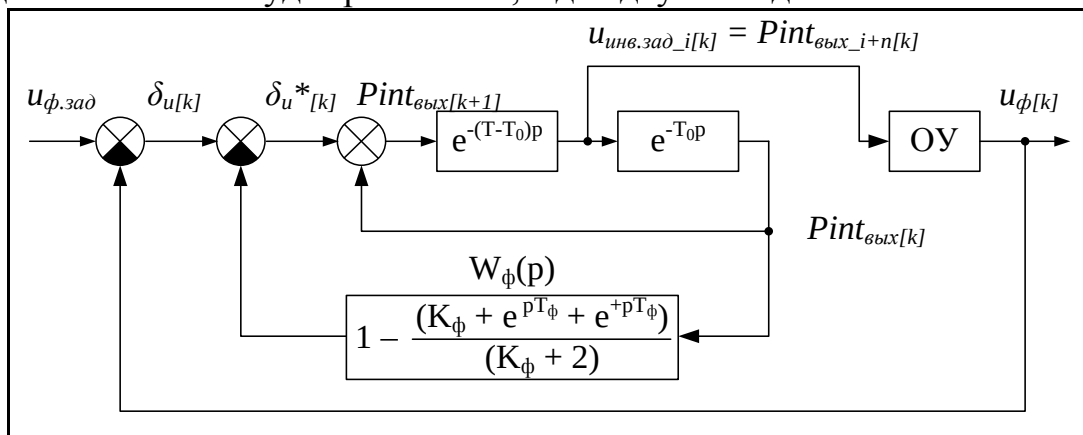


Рис. 15 Структура самообучающейся системы управления с упреждающей и параллельной коррекцией (W_{ϕ} – передаточная функция фильтра, δ_u^* – скорректированная ошибка по напряжению)

Качество работы самообучающейся системы управления, реализованной программно в блоке S-функции пакета MATLAB Simulink, в различных режимах работы оценивается на модели (см. рис. 16 и рис. 17). Делается вывод о перспективности применения такой системы на практике: амплитуда напряжения и КГИ удовлетворяют требованиям ГОСТ во всех режимах работы.

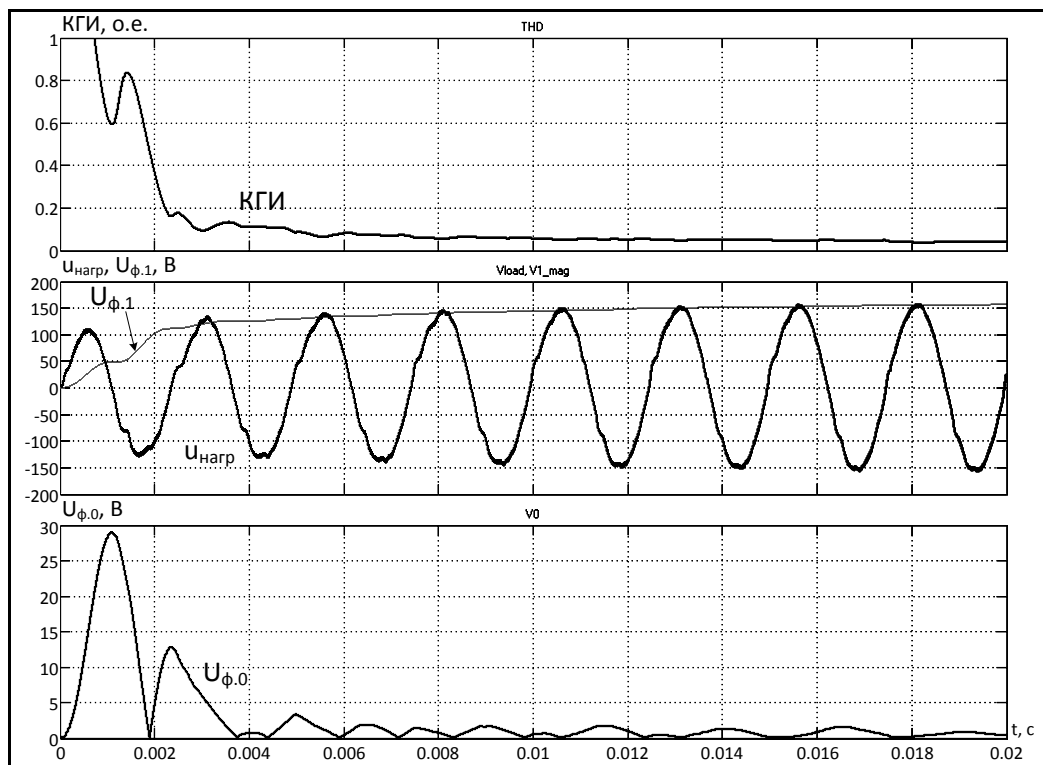


Рис. 16 Активно-индуктивная нагрузка – коэффициент гармонических искажений КГИ, выходное напряжение $u_{нагр}$ и амплитуда первой гармоники $U_{\phi.1}$, постоянная составляющая $U_{\phi.0}$

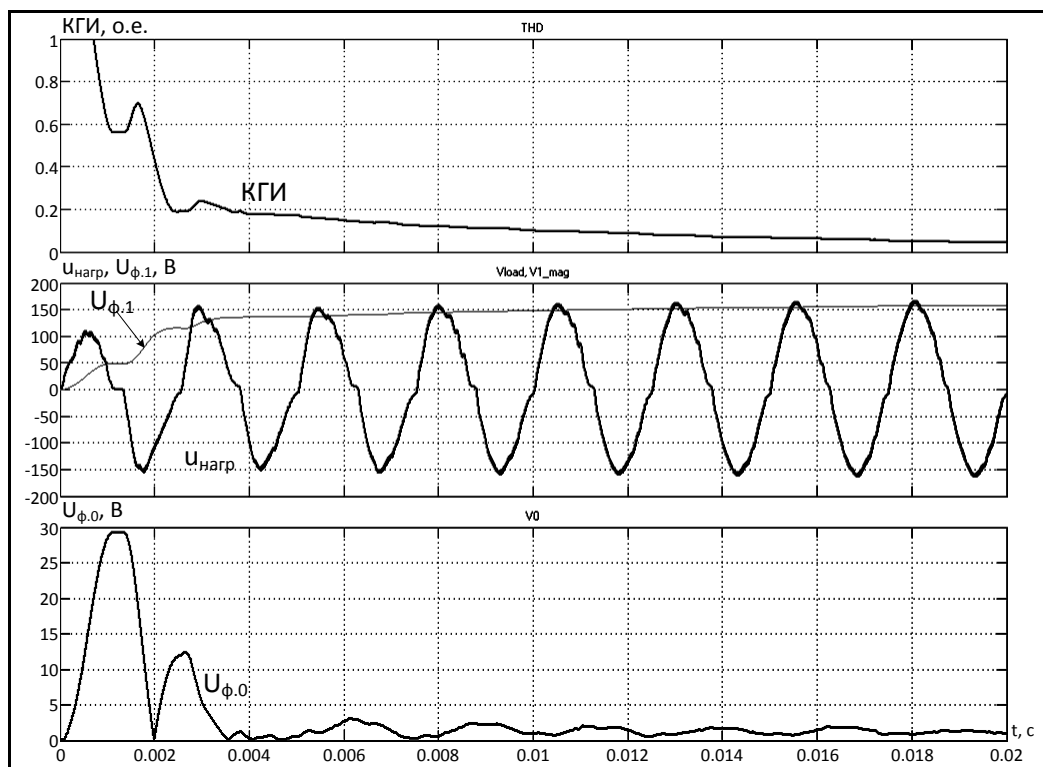


Рис. 17 Выпрямительная нагрузка – коэффициент гармонических искажений КГИ, выходное напряжение $u_{нагр}$ и амплитуда первой гармоники $U_{\phi.1}$, постоянная составляющая $U_{\phi.0}$

В заключении обобщены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ различных вариантов топологии преобразователей частоты для системы генерирования электроэнергии на борту воздушных судов типа ПСПЧ показал, что рациональной по массогабаритным показателям является схема с тремя однофазными мостовыми инверторами, тремя независимыми звеньями постоянного тока и синусным фильтром.
2. Разработаны модели преобразователей частоты для выбора рациональной структуры системы управления и рациональной топологии. Продемонстрирована неработоспособность распространенных замкнутых систем управления (системы подчиненного и релейного регулирования) при заданных параметрах выходного фильтра преобразователя частоты и быстродействии силовых ключей и специализированных микроконтроллеров.
3. Дана оценка влияния нелинейностей инвертора на гармонический состав выходного напряжения преобразователя частоты, обоснована необходимость его компенсации по разложению выходного напряжения ПЧ в ряд Фурье. Предложена система управления преобразователем частоты с компенсацией гармонических искажений, вызванных нелинейностями инвертора и нелинейной нагрузкой. Доказано, что поддержание первой гармоники и подавление наиболее выраженных высших гармоник (нечетных, с третьей по девятую) в ней обеспечивается исключительно программными средствами.
4. Разработан контроллер системы управления. Разработано и оптимизировано для работы в реальном времени программное обеспечение системы управления с коррекцией гармонического состава по данным дискретного преобразования Фурье.
5. Произведена наладка и настройка (с использованием разработанного вспомогательного ПО) работы системы управления с ДПФ в составе макетного образца преобразователя частоты. Лабораторными испытаниями макетного образца ПЧ мощностью 30 кВА доказано, что показатели качества вырабатываемой электроэнергии удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 54073 – 2010, причем коэффициент гармонических искажений составил порядка 1% при линейной и 2% при нелинейной нагрузке (максимально допустимые значения КГИ составляют 5% и 8%, соответственно).
6. Предложено использование системы управления на базе алгоритма самообучения (известного, как «Repetitive control») к задаче регулирования напряжения для снижения требований к вычислительным ресурсам микроконтроллера и повышения качества вырабатываемой электроэнергии. По результатам моделирования преобразователя частоты с самообучающейся системой регулирования сделан вывод о перспективности ее применения на практике. Значение коэффициента гармонических искажений, полученное в опытах на модели, оказывается ниже данного показателя системы управления с ДПФ в тех же условиях при гораздо меньших требованиях к производительности микроконтроллера. Программный код ядра самообучающейся системы регулирования отлажен на модели и может быть включен в состав программного обеспечения для контроллера без значительных доработок.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих

работах:

В изданиях, включенных в базы Scopus и Web of Science и в список ВАК:

1. **Simulation of power converter control system with compensation of harmonic distortion in output voltage waveform/ Anuchin, A., Kulmanov, V., Belyakov, Y. – 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings (DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146981) – 6 p.**
2. **Optimization of the division operation for real-time control systems/ Anuchin, A., Kozachenko, V., Kulmanov, V., Shpak, D. - 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings (DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146982) – 4 p.**
3. **Design and tests of a new promising ac electric-power generation system for aircraft/ Anuchin, A.S., Belyakov, Y.O., Gabidov, A.A., Kozachenko, V.F., Kulmanov, V.I., Ostirov, V.N. – Russian Electrical Engineering Volume 86, Issue 1, 1 January 2015, Pages 39-45 (DOI: 10.3103/S1068371215010034).**
4. **Simulation of power converter with repetitive control system for higher harmonics elimination/ Vasiliy Kulmanov, Aleksey Anuchin, Elena Bychkova, Yuliya Prudnikova – 2016 IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS'2016) (DOI: 10.1109/ICPDS.2016.7756685) – 5 p.**

В других изданиях:

5. **Компенсация гармонических искажений выходного напряжения в источниках питания с синусным фильтром/ Анучин А.С., Кульманов В.И., Беляков Ю.О. – труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в двух томах, том 1, 2014 – с. 422-426.**
6. **Выбор рациональной структуры цифровой системы управления источников вторичного стабилизированного питания переменного тока/ Анучин А.С., Кульманов В.И., Беляков Ю.О. – Международная научно-техническая конференция «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.», 16-21 сентября 2013 г. №36 (1009) стр. 234-235.**
7. **Регулирование гармонического состава выходного напряжения высокочастотного инвертора/ Ю.О. Беляков, В.И. Кульманов. – Труды МЭИ Электропривод и системы управления. М.: Изд. МЭИ, 2013. Вып. 689. Стр. 48–55.**