

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПИТАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### Введение

В авиационной технике традиционно применяется система электроснабжения переменного тока частотой 400 Гц, так как она имеет оптимальное соотношение мощности и массы электромеханических преобразователей энергии. В качестве первичного источника энергии применяется авиационный двигатель, часть мощности вращения которого отбирается бортовыми потребителями. Так как частота вращения двигателя не постоянна, то для приведения во вращение электрического генератора используется преобразователь постоянной частоты вращения — гидравлический преобразователь частоты, устроенный подобно гидравлическим коробкам переключения передач в автомобилях. К недостаткам данного подхода можно отнести низкий КПД преобразования — потери достигают нескольких процентов от мощности авиационных двигателей.

С развитием полупроводниковой преобразовательной техники появилась возможность взамен имеющейся схемы применить схему «генератор непостоянной частоты вращения – выпрямитель – инвертор – синусный фильтр», имеющую те же массогабаритные показатели, но существенно более высокий КПД по сравнению с гидравлической.

### Структура силовой части преобразователя

К силовому преобразователю предъявляются требования, определяющиеся в ГОСТР 54073-2010. Это ошибка в фазировке между фазными напряжениями не более  $2^\circ$ , коэффициент гармонических искажений не более 5%, амплитуда должна находиться в диапазоне от 1,31 до 1,51 от заданного действующего значения, возможность работы с несимметричной нагрузкой, выпрямительной нагрузкой и при обрыве одной из фаз.

В качестве возможных схем было рассмотрено несколько конкурирующих вариантов: матричный преобразователь, трехуровневый инвертор и тройной комплект мостовых инверторов, питающихся от независимых выпрямителей и секционированного генератора. Каждая схема имеет как преимущества, так и недостатки.

Матричный преобразователь требует установки выходного С-фильтра вместо LC в других схемах, так как в этом случае полезной оказывается собственная индуктивность фазы генератора. Однако из-за большой частоты выходного напряжения и существенной пульсации тока фазы генератора нельзя напрямую применять те алгоритмы управления, которые были разработаны для матричных преобразователей с асинхронными двигателями [1]. Кроме этого отсутствие готовых ключей или силовых модулей для матричных преобразователей делает его конструкцию более громоздкой, чем конструкция конкурирующих схем.

Трехуровневый инвертор по сравнению с обычным инвертором позволяет снизить габариты выходного LC-фильтра в 4 раза и может быть принята в качестве базовой, однако необходимость применения дополнительных диодов делает данную схему более сложной по сравнению с независимыми мостовыми инверторами [2]. Схема с независимыми инверторами хорошо реализуется на базе двух модулей Infineon HybridPACK2 [3], разработанных специально для жидкостного охлаждения. Ее функциональная схема представлена на рис. 1. Эта схема была выбрана за базовую еще и по причине простоты разработки силовой части в виду наличия готовых демонстрационных образцов модулей Infineon. Управление возбуждением генератора на схеме не показано, так как не имеет непосредственного отношения к рассматриваемым вопросам.

### Структура системы управления

В качестве возможных структур систем управления рассматривались варианты подчиненного регулирования во вращающейся системе координат с контурами токов и напряжения, структура с релейным формированием выходного напряжения и разомкнутая структура. Релейный вариант не обеспечивал требуемого качества выходного напряжения, а структура подчиненного регулирования не обеспечивала необходимой жесткости выходных характеристик и быстродействия из-за специфического сочетания параметров выходного LC-фильтра, разработанного исходя из критерия минимальной массы. Кроме того, структура подчиненного регулирования во вращающихся координатах плохо справляется с несимметричными нагрузками. В итоге наилучшие результаты были получены в разомкнутой системе регулирования с релейным токоограничением. Релейное токоограничение было выполнено с частотой принятия решения в 4 раза большей, чем частота ШИМ, что позволило отрабатывать короткие замыкания и перегрузки без существенных выбросов токов инвертора. Структура системы управления представлена на рис. 2.

Генератор задающего воздействия формирует синусоидальное задание, которое пересчитывается в скважность сигнала управления по стойкам инвертора. Задание скважности масштабируется с учетом текущего уров-

на входного выпрямленного напряжения питания инвертора и поступает на модуль ШИМ микроконтроллера. Широтно-импульсные сигналы сравнения поступают через переключатель на управление ключами инвертора. Инвертор формирует выходное напряжение на LC-фильтре. Ток дросселя LC-фильтра по модулю сравнивается с максимально-допустимым током фазы инвертора и при превышении происходит выключение ШИМ с помощью переключателя.

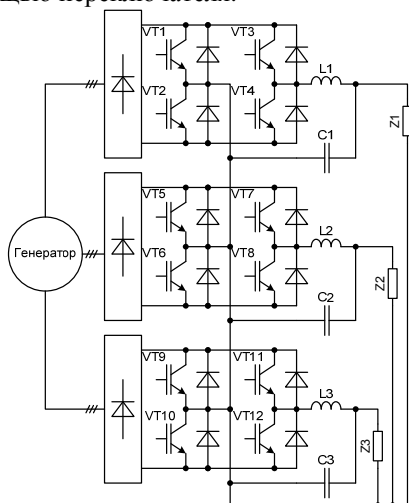


Рис. 1. Функциональная схема энергетической установки с мостовыми инверторами с независимым питанием

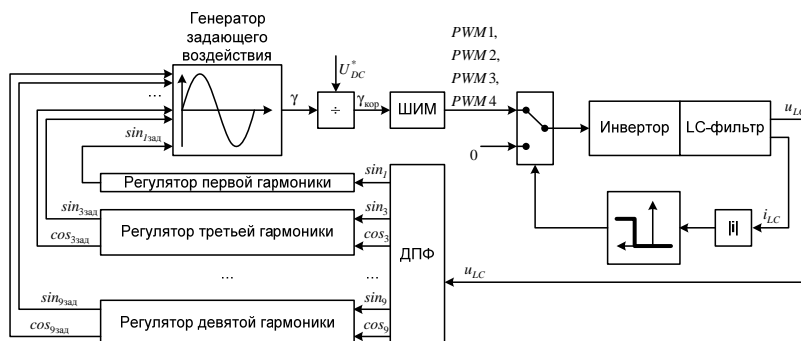


Рис. 2. Функциональная схема структуры системы управления

По результатам моделирования было выявлено, что на различных видах нагрузки коэффициент гармонических искажений достигает 15%, что выходит за допуск, определенный ГОСТР 54073-2010. Наибольшие искажения вносятся влиянием «мертвого» времени. Но компенсировать его традиционным для частотно-регулируемого электропривода методом [ссылка на статью в ленинградской конференции] не представляется возможным из-за большой пульсации тока дросселя выходного фильтра: на более чем половине периодов ШИМ даже при полной нагрузке ток «цепляет» ноль, и оценить его влияние на выходное напряжение для целей компенсации не представляется возможным.

Существует две принципиальные возможности произвести компенсацию: измерить выходное напряжение инвертора некоторым способом, чтобы точно знать уровень искажений для компенсации, или, измеряя выходное напряжение фильтра, разложить его на гармоники и отрегулировать каждую из составляющих в отдельности.

Первый подход требует наличия датчика выходного напряжения и какого-либо интегрирующего АЦП или другого интегрирующего устройства с временем преобразования, равным периоду ШИМ. Подобное устройство может быть спроектировано, однако это лишний датчик и его обвязка, что отрицательно сказывается на надежности и весе всего преобразователя.

Второй подход заключается в разложении кривой выходного напряжения на синусоидальные и косинусоидальные составляющие всех гармоник, присутствующих в выходном сигнале — это все нечетные гармоники с первой по девятую. Остальные гармоники уже не являются сколько-нибудь значимыми. Выделенные составляющие подаются на регуляторы, которые вносят коррекцию в развертку управляющего воздействия, компенсируя каждую из них. Синусоидальная составляющая первой гармоники поддерживается регулятором на номинальном уровне независимо от изменения нагрузки.

### Выводы

В результате математического моделирования силовой части и системы управления с компенсацией до 9-ой гармоники был получен коэффициент гармонических искажений менее 4%. Произведена разработка контроллера системы управления на базе нового поколения двухядерных микроконтроллеров семейства Concerto для управления двигателями, написано программное обеспечение. Натурные испытания системы управления запланированы на октябрь 2013 года.

### Библиографический список

1. Р.Т. Шрейнер, В.К. Кривовяз, Координатная стратегия управления непосредственными преобразователями частоты с ШИМ для электроприводов переменного тока, Электротехника – 2003.
2. Частотное управление асинхронного электропривода, Энциклопедия «Машиностроение», том IV-2 «Электропривод. Гидро- и виброприводы», книга 1 «Электропривод», Москва, Машиностроение, 2012, с.256-279.
3. <http://www.infineon.com/cms/en/product/power/modules-discs-and-systems/automotive-igbt-modules/hybridpack-tm-modules/hybridpack-tm2/channel.html?channel=db3a30431a5c32f2011a727cfc3708e>
4. Анучин А.С., Широтно-импульсная модуляция методом реализации мгновенных фазных потенциалов для трехфазных инверторов напряжения, Труды V Международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007, Санкт-Петербург, 2007, с.263-265