***ООО "Системы ПромАвтоматики"***

***(СПА)***

15

**Инвертор 2015**

***Управляющий контроллер***

**Введение**

Инвертором называется устройство, преобразующее постоянный ток в переменный с постоянными или регулируемыми значениями выходного напряжения и частоты. Если инвертор работает на нагрузку, не имеющую другого источника питания, он называется автономным. Автономные инверторы применяются для питания потребителей переменным током от аккумуляторных батарей или других источников постоянного тока в составе источников бесперебойного питания (ИБП).

**Принцип построения**

Принцип построения устройства заключается в том, что при помощи предварительного высокочастотного преобразования получают напряжение [постоянного тока](http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/111702), значение которого близко к амплитудному значению синусоидального выходного напряжения инвертора. Затем это напряжение постоянного тока с помощью многократной [широтно-импульсной модуляции](http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/29402), преобразуется в переменное напряжение по форме, близкое к синусоидальному. Идея многократной [ШИМ](http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/29402) заключается в том, что на интервале каждого полупериода выходного напряжения соответствующая пара [транзисторов](http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/13085) мостового DC-AC преобразователя коммутируется на высокой частоте (многократно) при широтно-импульсном управлении. Причем длительность этих высокочастотных импульсов коммутации изменяется по синусоидальному закону. Затем с помощью фильтра нижних частот выделяется синусоидальная составляющая выходного напряжения инвертора.

Таким образом, инвертор представляет собой устройство, состоящее из последовательно включенных:

* Мостового стабилизированного DC-DC повышающего преобразователя;
* мостового DC-AC преобразователя напряжения;



Рис. 1

Блок схема устройства

Повышающий DC-DC преобразователь выполнен в виде мостового трансформаторного преобразователя с фазовым управлением. Для ограничения пиковых значений тока, на входе включен токовый трансформатор измерителя . Измеренное мгновенное значение с помощью компараторов сравнивается с двумя порогами тока, превышение которых фиксируется контроллером. Первый порог выбирается таким образом, чтобы при достижении его, преобразователь мог работать неограниченно долго. Увеличение мгновенного тока выше первого порога вызывает отключение тока через трансформатор до конца периода преобразования, обеспечивая, тем самым, ограничение мощности, отдаваемой в нагрузку. Поскольку время запирания транзисторов, конечно, то после того, как управляющее воздействие с затворов снято, ток через трансформатор продолжает протекать еще некоторое время. Второй порог выбирается так, чтобы при отсутствии одностороннего намагничивания сердечника ток, за время запирания транзисторов, не достигал второго порогового уровня. В случае значительной перегрузки например при коротком замыкании, возникает одностороннее намагничивание, индуктивность первичной обмотки трансформатора уменьшается, скорость нарастания тока увеличивается, что приводит к тому, что за время запирания транзисторов ток успевает увеличиться до второго порогового уровня и контроллер блокирует работу преобразователя на 10 периодов преобразования, обеспечивая тем самым условия для естественного размагничивания сердечника.

Повышающий преобразователь работает на динамическую нагрузку, которой является DC-AC преобразователь напряжения. Потребляемый DC-AC преобразователем ток пульсирует с удвоенной частотой выходного напряжения, причем его мгновенные значения изменяются от нуля до максимального значения. При использовании инверторов в телекоммуникационных системах на них помимо стандартных требований накладываются жесткие требования по качеству потребляемого тока от шин постоянного напряжения. Прерывистый потребляемый ток вызывает низкочастотную помеху, кратную выходной частоте инвертора, подавить которую традиционными фильтрами не просто. Существенное улучшение 100-герцовых пульсаций потребляемого тока достигается путем изменения структуры типового контура обратной связи DC-DC-преобразователя. В частности, в контуре обратной связи по напряжению преобразователя DC-DC стабилизируется сигнал, представляющий собой сумму сигнала, пропорционального выходному напряжению, и сигнала, пропорционального 100-герцовой составляющей входного тока инвертора. При такой организации контура обратной связи система подавляет 100-герцовую составляющую во входном токе путем увеличения 100-герцовой пульсации напряжения на выходе преобразователя DC-DC. Кроме того, высокий нагрузочный пик-фактор, требует реализации эффективных методов ограничения мощности DC-DC повышающего преобразователя инвертора. Наиболее просто такие разнообразные требования учитываются при использовании многоконтурных подчиненных систем регулирования. В многоконтурной подчиненной системе предусматривается несколько контуров регулирования со своими регуляторами, причем выходной сигнал регулятора внешнего контура является предписанным значением для внутреннего контура, т.е. работа каждого внутреннего контура подчинена внешнему контуру. Система управления DC-DC преобразователем является двухконтурной. Внешний, медленный контур напряжения отвечает за стабилизацию выходного напряжения DC-DC преобразователя, внутренний быстрый контур тока отвечает за форму потребляемого DC-DC преобразователем тока. В идеальном случае потребляемый DC-DC преобразователем ток из источника постоянного напряжения не должен содержать переменной составляющей, что соответствует коэффициенту мощности, равному единице, но при этом появляются пульсации выходного напряжения DC-DC преобразователя, которые могут сказаться на качестве переменного напряжения на выходе инвертора. Оптимальные параметры ПИ-регуляторов внешнего и внутреннего контуров позволяют существенно снизить пульсации входного тока при допустимом ухудшении синусоидальности выходного напряжения инвертора и обеспечивают эффективное ограничение мощности нагрузок, носящих существенно-нелинейный характер, типичным примером, которых являются широко распространенные на практике выпрямители с емкостными фильтрами.

В качестве датчика тока DC-DC преобразователя (используется пара токовых трансформаторов, включенных в цепи выходного выпрямителя работающих на общую нагрузку. Цифро-аналоговое преобразование сигналов, пропорциональных току и напряжению DC-DC осуществляется с помощью 8-ми разрядных АЦП ADS7885, работающих на частоте 1,38 МГц. с последующей фильтрацией и децимацией до частоты преобразования. Сдвиг постоянной составляющей выходного напряжения с уровня 350 В до уровня 1.6 В производится цепочкой стабилитронов. Диапазон значений напряжения (, транслируемых на вход ПИ регулятора внешнего контура составляет ±7.5 В. от номинального значения (350 В). В режиме стабилизации этого диапазона достаточно, а для осуществления плавного запуска преобразователя, когда требуется контроль выходного напряжения DC-DC преобразователя в более широких пределах, используются показания измерителя среднеквадратичного значения напряжения на выходе DC-AC преобразователя, которые находятся в прямо пропорциональной зависимости с напряжением DC-DC преобразователя.

Собственно инвертор выполнен в виде мостового бестрансформаторного преобразователя. Контроль и ограничение мгновенных значений тока транзисторов осуществляется аналогично DC-DC преобразователю, за исключением того, что ток в цепи выходного фильтра (контролируется по модулю, для чего используется резистивный шунт и две пары компараторов.

Для измерения среднеквадратичных значений напряжений, токов и активных мощностей на выходе инвертора (), (), на общей шине инверторной сборки (), а так же напряжения в сети используются сдвоенные сигма-дельта модуляторы DS8102.

Современной тенденцией построения однофазных источников бесперебойного питания становится модульный принцип, обеспечивающий наиболее отказоустойчивые и наращиваемые по мощности системы бесперебойного электропитания. Модульный принцип построения ИБП широко используется многие годы в системах постоянного тока. В основе таких систем заложено параллельное включение выпрямительных модулей на общую выходную шину, что обеспечивает необходимое резервирование системы и возможность наращивания мощности системы при необходимости увеличения числа потребителей. В последнее десятилетие получило распространение параллельное включение по выходу однофазных инверторов мощностью 1 - 3 кВА с использованием независимого принципа синхронизации системы от любого из инверторов, включенных в нее. Информационная связь между модулями осуществляется по цифровой шине. После подключения очередного модуля, происходит тестирование его состояния, и при исправности системы, он автоматически определяется остальными подключенными к нагрузке модулями, что приводит к соответствующему перераспределению тока нагрузки. При возникновении неисправности одного из модулей, он автоматически отключается от шины нагрузки, что позволяет изолировать поврежденный инвертор без отключения нагрузки от остальных модулей.

Ввиду необходимости реализации различных схем резервирования питания нагрузки, в состав источника бесперебойного питания также может быть введено устройство статического байпаса.

**Управление инверторами, работающими на общую нагрузку**

Система бесперебойного питания построена на основе параллельного включения инверторов, работающих, как автономные при количестве устройств равном единице и как синхронно-синхронизируемые, при большем количестве.

Для того, чтобы два или более инверторов, подключенных к общей нагрузке, были загружены в равной степени, необходимо синхронизировать их выходные напряжения по частоте, начальной фазе и амплитуде, а так же синхронизировать работу ШИМ модуляторов всех инверторов по частоте преобразования. Нарушение синхронизации по любому из параметров приводит к возникновению уравнительных токов.

Нарушение синхронизации выходного напряжения и частоты преобразования в наименьшей степени влияет на дисбаланс распределения мощностей, поэтому эти два параметра устанавливаются системами автоматического регулирования (синхронизируемые), а синхронность работы инверторов по частоте и фазе выходного напряжения обеспечивается распределенной системой задающих генераторов и цифровой шиной синхронизации.

**Плавный запуск и подключение нагрузки**

Для исключения аварийных ситуаций, включение преобразователя производится в строго определенной последовательности.

 

**Контроллер**

Блок-схема контроллера управления приведена на Рис.2.

В качестве управляющего микроконтроллера используется микросхема C8051F565 Silicon Laboratories. Микроконтроллер имеет встроенные 12-и разрядное АЦП, используемое для определения адреса устройства и определения температуры и контроллер шины CAN, обеспечивающий информационный обмен с другими устройствами системы.

Параллельная двунаправленная шина данных между микроконтроллером и ПЛИС позволяет управляющей программе иметь максимально быстрый доступ к регистрам, расположенным в ПЛИС, для получения информации об измеренных напряжениях, о состоянии контроллера инвертора и для управления и синхронизации всех узлов. Кроме того, частота тактового генератора микропроцессора используется и для тактирования ПЛИС, что обеспечивает синхронный режим работы всех узлов.

На ПЛИС Spartan-III Xilinx реализован контроллер управления силовой частью инвертора и измерители действующих значений напряжений и токов, задающий генератор 50 Гц и устройства синхронизации.

Сигма-дельта АЦП измерения переменных токов и напряжений состоят из двух частей: модулятора и цифрового ФНЧ.   
Модулятор преобразует входное напряжение в последовательность импульсов, а ФНЧ формирует выходной код. Микросхемы сигма-дельта модуляторов DS8102 расположены на плате измерителей, а цифровые ФНЧ реализованы в ПЛИС в виде фильтров, по одному на каждый канал измерения.



Рис. 1

Блок-схема контроллера управления

Блок измерений осуществляет вычисление средних значений токов и напряжений, а так же значение активной мощности отдаваемой инвертором в нагрузку.

Среднеквадратичные значения напряжений и токов вычисляются как:

Мощность рассчитывается как:

Для контроля и управления напряжения измеряются на периоде 10 мс, для мониторинга и выравнивания мощностей при параллельной работе нескольких модулей напряжения, токи и мощность измеряются на периоде 100 мс.

Каждый инвертор имеет собственный DDS (Direct Digital Synthesizer) генератор гармонического сигнала 50 Гц, синхронизируемый с частотой сети посредством системы фазовой автоподстройки частоты. Отсчеты формируемого гармонического сигнала передаются с частотой 10800 Гц в блок синхронизации.

Блок синхронизации постоянно анализирует состояние шины синхронизации. При поступлении данных по шине, они передаются в блок интерполяции, при отсутствии информационных посылок, блок синхронизации начинает транслировать на шину синхронизации данные, полученные от собственного генератора. Если данные, поступающие с шины синхронизации, соответствуют данным переданным на шину, значит

данные удачно переданы собственному приемнику и приемникам остальных инверторов, если обнаружено несоответствие, значит, что более одного инвертора пытаются передавать данные синхронизации. Инвертор, обнаруживший несоответствие, прекращает передачу. Таким образом, вышеописанная процедура гарантирует, что на шине синхронизации всегда присутствуют данные только одного из задающих генераторов.

Отсчеты сигнала 50 Гц, поступившие по шине синхронизации, попадают в блок интерполяции, дополняются нулевыми отсчетами (по три нулевых отсчета на каждый поступивший) и фильтруются цифровым ФНЧ с частотой пропускания 100 Гц. Цифровой гармонический сигнал с частотой

квантования 43200 Гц с выхода интерполяционного фильтра поступает в блок PWM, где используется для задания параметров очередного цикла преобразования.

Поскольку контроллеры всех инверторов получают данные с одной шины синхронизации и одинаково их интерпретируют, то работа всех преобразователей оказывается синхронной по частоте и фазе выходного напряжения. Т.к. все генераторы синхронизируются с частотой сети – активный генератор ведущего инвертора и неактивные генераторы остальных инверторов при наличии напряжения сети являются когерентными и смена «лидера» никак не влияет на работу преобразователей.

9-и разрядный PWM формирует сигналы управления мощными ключами мостового преобразователя. В течении первого полупериода ШИМ модулятором является левый столб моста, при фиксированном состоянии правого, а в течении второго полупериода наоборот. Сигнал «Токовая защита» прерывает очередной цикл преобразования, переводя все четыре ключа в запертое состояние, и запрещает работу формирователя на все время пока сигнал активный, предотвращая тем самым перегрузку силовой части преобразователя.

Поскольку выходной фильтр инвертора не в состоянии полностью подавить частоту преобразования, в случае неравенства частот преобразования PWM разных блоков между инверторами возникают уравнивающие токи с частотами биений. Частота поступления отсчетов по шине синхронизации используется системой фазовой автоподстройки частоты для синхронизации частоты собственного тактового генератора с частотой тактового генератора ведущего инвертора с целью выравнивания частот преобразования и минимизации уравнивающих токов между инверторами. Блок «ФАПЧ несущей» вырабатывает сигнал ошибки, который преобразуется в аналоговую форму ШИМ модулятором и, воздействуя на варикап в цепи кварцевого генератора микроконтроллера, изменяет частоту тактирования.

**Мониторинг**

Мониторинг инверторов осуществляется по шине CAN с помощью Устройства Контроля и Управления (УКУ). Управляющий микропроцессор, на этапе инициализации, определяет адрес инвертора, заданный внешними резисторами, и использует его во время работы для информационного обмена по шине CAN. Адресация возможна в двух системах: двоичной и четверичной.

В двоичной системе для задания ‘0’ к выводу подключается либо перемычка либо резистор номиналом 1 кОм, для задания ‘1’ – не подключается ничего. Адресуемое пространство 8 устройств.

В четверичной системе для осуществления адресации к адресным контактам инвертора подключаются резисторы четырех номиналов, 10R, 4K7, 10K, 24K. Адрес вычисляется в четвертичной системе, т.е. максимальное адресуемое пространство 4\*\*3 - 64 устройства.

Adr = a2 \* 16 + a1 \* 4 + a0 ; где a2, a1, a0 нормированные до значений [0 - 3] показания АЦП по соответствующим адресным входам.

Два старших разряда шестиразрядного адреса в аналоговой системе адресации определяют фазу данного инвертора. 0 – A, 1 – B, 2 – C. Оставшиеся 4 разряда определяют номет устройства в системе (0 – 15).

Информация в сети CAN передается 8-байтными пакетами со стандартным (не расширенным) 11-битным идентификатором. Пакеты от УКУ к инверторам имеют идентификатор 0x09E, пакеты от инверторов к УКУ имеют идентификатор 0x18E. Обмен осуществляется на скорости 62.5 кбод.

УКУ присылает инвертору пакет из 8 байт B[0] – B[7]. Инвертор проверяет условие ((B[0]==Adr)&&(B[1]==Adr)). Если оно выполняется, инвертор считает что пришедший пакет предназначен именно ему и анализирует остальные байты пакета.

Для двухбайтных значений – младший байт первый.

***Внимание !!!***

УКУ признает инвертором и Bypass только устройства с адресом больше 20.

Если адрес задается в двоичной системе, устройство автоматически добавляет к адресу 20. В четверичной системе, контроль за правильностью задания адреса возлагается на оператора.

**Запрос телеметрии.**

Если выполняется условие (B[2]==0xED) то пришедший пакет является запросом телеметрии.

Инвертор отвечает на эту команду двумя последовательными CAN-пакетами по 8 байт каждый.

Кроме того, теперь инвертор вне зависимости от запроса, самостоятельно 2 раза в секунду отправляет эти два пакета телеметрии, что делает возможным использование пассивной системы мониторинга.

Первый пакет:

B[0] – Adr | 0x40; Адрес инвертора с взведенным 6-м битом

B[1] – 0xDD;

B[2:3] – двухбайтное слово соответствующее току в формате 12.3А;

B[4:5] – двухбайтное слово соответствующее активной мощности инвертора в формате 234Вт (-234Вт);

B[6:7] – двухбайтное слово соответствующее выходному напряжению инвертора в формате 223.4В.

Второй пакет:

B[0] – Adr | 0x40; Адрес инвертора с взведенным 6-м битом;

B[1] – 0xDE;

B[2] – однобайтное слово соответствующее температуре в единицах градусов Цельсия;

B[3] – байт флагов инвертора (1 – активно):

B[3,0] – перегрузка по мощности (активной или полной),

B[3,1] – температура > 80 град.,

B[3,2] – температура > 70 град.,

B[3,3] – напряжение вне допуска,

B[3,4] – 0 – ведомый, 1 - ведущий,

B[3,5] – 0- инвертор offline, 1 – инвертор online,

B[3,6] – Приоритет 0 – сеть, 1 - инвертор,

B[3,7] – Состояние 0 – сеть, 1 - инвертор;

B[4:5] – двухбайтное слово соответствующее напряжению сети в формате 220,0В;

B[6:7] – двухбайтное слово соответствующее напряжению нагрузки в формате 220,0В;

**Запрос пакета конфигурирования**

Если выполняется условие (B[2]==0xFD) то пришедший пакет является запросом пакета конфигурирования.

Инвертор отвечает на эту команду CAN-пакетом:

B[0] – Adr | 0x40; Адрес инвертора с взведенным 6-м битом

B[1] – 0xDF;

B[2] – Минимальное напряжение выхода (0 - 255);

B[3] – Максимальное напряжение выхода (0 - 255);

B[4] – Паспортная мощность инвертора (0 – 1500 Вт., 1 – 2000 Вт.);

B[5] – Контроль сети: 0 - нет, 1 – Только амплитуда, 3 – полный.

B[6] – Управление ШИМ, 0 – выкл., 1 – вкл.

**Калибровка инвертора.**

Если выполняется условие ((B[2]==0xEE) )&&(B[3]==B[4])) то пришедший пакет является управляющим калибровкой измерителя.

Четыре старших разряда B[3] идентифицируют параметр:

((B[3]&0xf0)==0x00) выходное напряжение инвертора;

((B[3]&0xf0)==0x20) ток инвертора.

(B[3]==0x21) нуль тока.

((B[3]&0xf0)==0x30) температура инвертора.

((B[3]&0xf0)==0x40) выходное напряжение нагрузки;

((B[3]&0xf0)==0x50) выходное напряжение сети;

((B[3]&0xf0)==0x60) активную мощность инвертора;

((B[3]&0xf0)==0xA0) минимальное напряжение выхода инвертора;

((B[3]&0xf0)==0xB0) максимальное напряжение выхода инвертора;

((B[3]&0xf0)==0xC0) паспортная мощность инвертора;

((B[3]&0xf0)==0xD0) контроль сети (+/- 1);

((B[3]&0xf0)==0xE0) управление ШИМ (+/- 1);;

((B[3]&0xf0)==0xF0) выключение;

А четыре младших определяют действие.

((B[3]&0x0f)==0x02) + 1;

((B[3]&0x0f)==0x03) + 10;

((B[3]&0x0f)==0x04) - 1;

((B[3]&0x0f)==0x05) - 10;

**Система выравнивания активных мощностей и стабилизации выходного напряжения**

С целью выравнивания активных мощностей инверторов, каждый инвертор 8 раз в секунду отправляет по шине CAN один пакет со стандартным (не расширенным) 11-битным идентификатором 0x09E.

B[0] – Adr | 0x40; Адрес инвертора с взведенным 6-м битом;

B[1] – 0xDС;

B[2] – 0 – ведомый, 1 - ведущий;

B[3] – 0 – это инвертор, 1 – это Bypass;

B[4:5] – двухбайтное слово соответствующее мощности инвертора;

B[6:7] – корректирующий коэффициент (актуально, если это посылка ведущего);

Ведущий инвертор стабилизирует свое выходное напряжение на уровне 220В. Ведомые тупо корректируют свое напряжение с помощью корректирующих коэффициентов, получаемых от ведущего. Кроме того, каждый инвертор постоянно получает информацию о состоянии всех остальных инверторов системы. Зная количество инверторов в системе и активную мощность каждого, контроллер вычисляет среднее значение активной мощности, которую должен отдавать каждый инвертор для получения равномерной загрузки всех инверторов в системе и на основании этих расчетов производится дополнительная корректировка выходного напряжения. Таким образом, система стремится к состоянию, в котором выходное напряжение ведущего равно 220 В. и мощность потребляемая нагрузкой делится поровну между всеми работающими инверторами.

Если в системе присутствует внешний Bypass, то он ведет себя ровно так же, как любой ведущий инвертор, отличие состоит только в том, что он всегда ведущий, вне зависимости от того, нравится это кому то или нет, и для расчета корректирующего коэффициента, передаваемого ведомым инверторам, он использует напряжение нагрузки, т.е. в системе с Bypass стабилизируется не напряжение общей шины, а напряжение на нагрузке.

**Защита и индикация**

С целью исключения аварийных режимов, постоянно контролируется напряжение, активная мощность, полная мощность и температура инвертора.

Нарушение допустимых пределов сопровождается световыми и звуковыми сигналами.

* 1. Если рабочая температура превышает 70 градусов, но не достигла 80 градусов – красный светодиод моргает 2 раза, каждые 3 секунды. Звуковой сигнал не подается, Отключение инвертора не производится.
  2. Если температура превысила 80 градусов, красный светодиод светится постоянно, инвертор отключается до тех пор, пока температура блока не снизится до 70 градусов.
  3. Если активная мощность находится в пределах 2000<Pa<24000Вт. или полная мощность в пределах 3000<P<3600ВA. – красный светодиод моргает 1 раз в 5 секунд. Отключение инвертора не производится, Звуковой сигнал не подается.
  4. Если Pa>2400Вт. или P>3600ВA. – красный светодиод моргает 1 раз в секунду, подается звуковой сигнал, отключение инвертора происходит через 20 секунд.

После отключения инвертора по причине перегрузки, трижды производится повторное включение через 10 секунд, то далее, если причина перегрузки не устранена, в дальнейшем рестарт производится с интервалом 1 час.

Во время останова, зеленый светодиод индицирует причину отключения:

* Серии из 2-х вспышек – перегрузка по току.
* Серии из 3-х вспышек – Неисправность контура регулирования DC-DC преобразователя.