

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПИТАНИЯ

Билл Хатчингс, Microchip Technology Inc.

К современным цифровым источникам питания предъявляются высокие требования по производительности, КПД и рассеиваемой мощности. В статье рассматриваются практические решения, позволяющие разработчикам достичь необходимого уровня этих параметров. В статье показывается как использование цифровых сигнальных контроллеров или DSC (Digital Signal Controllers) упрощает топологию и схемы управления многочисленных цифровых преобразователей питания. Обсуждаются скорости переключения при широтно-импульсной модуляции (ШИМ), скорость преобразования АЦП и возможности аналоговых компараторов, а также описываются некоторые варианты топологии импульсных источников питания.

Традиционные импульсные преобразователи постоянного и переменного тока используют для управления ШИМ-модулями и силовыми элементами аналоговые управляющие цепи. В этих системах дополнительные функции управления и передачи цифровых данных, выполняемые микроконтроллером, выведены на «верхний» уровень. В цифровых источниках питания аналоговая управляющая цепь заменяется цифровой, а ШИМ-модуль обычно встроен в тот же микроконтроллер, которых осуществляет общее управление и передачу данных.

Использование цифрового управления позволяет разработчикам добиться больших преимуществ. Эти преимущества достигаются за счет использования программного обеспечения для управления преобразованием, а также вычислительной мощности и возможностей цифровых сигнальных контроллеров. Преимущества заключаются в увеличении удельной мощности, сокращении времени выхода на рынок и упрощении производства, легкости добавления новых функций, повышении надежности и улучшении защиты интеллектуальной собственности.

АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

С помощью современной технологии ЦОС можно реализовать множество топологий преобразователей напряжения. На рисунке 1 показана упрощенная схема цифровой управляющей системы для преобразования питания.

Все, что выделено пунктирной линией, содержится внутри цифро-

вого сигнального контроллера. Для реализации цифровой петли управления аналоговый сигнал должен быть первым делом оцифрован с помощью АЦП. Затем эти цифровые значения обрабатываются программой ЦПОС для получения управляющих кодов для регулирования тока и напряжения, необходимых для управления источником питания. Результаты этих вычислений используются для управления встроенным цифровым ШИМ-модулем, который непосредственно управляет силовыми узлами. Таким образом, основная часть петли управления программно реализуется на ЦПОС (чаще всего использующем целочисленную арифметику). Внутренняя архитектура ЦПОС представляет собой объединение микроконтроллера и цифрового сигнального процессора. При этом именно ЦПОС-часть отвечает за выполнение основной доли вычислений при реализации алгоритмов цифрового управления источником питания.

Чтобы обеспечить надежность, высокую удельную мощность и высокий КПД, цифровые сигнальные контроллеры, используемые в схеме управления, должны быть самодостаточными. Это очень важно, так как если в конструкции используется

большое количество внешних элементов, то все указанные параметры значительно ухудшаются.

На рисунке 2 представлена блок-схема цифрового сигнального контроллера, содержащего все необходимые для создания высокопроизводительного и надежного цифрового источника питания элементы. Перечислим его отличительные черты и встроенные интерфейсные блоки, позволяющие уменьшить количество внешних компонентов повысить надежность конструкции:

- высокоскоростные цифровые ШИМ, разработанные специально для мостовых преобразователей;
- высокоскоростные АЦП со встроенными устройствами выборки/хранения и специализированными режимами запуска;
- встроенные аналоговые компараторы, предназначенные для реализации специфических высокоскоростных алгоритмов управления, например, ограничения выходного тока;
- подсистема питания для формирователей сигнала сброса при частичном отключении питающей сети или включении источника питания и собственно цифрового сигнального процессора;
- прецизионный RC-генератор и узлы ФАПЧ, формирующие все тактовые сигналы для процессора и периферийных узлов;
- достаточное количество интерфейсных блоков;
- флэш-память и ОЗУ;
- малые размеры;
- расширенный температурный диапазон.

Разработчику необходимо предусмотреть дополнительный источник питания для схем управления и цифрового сигнального контрол-

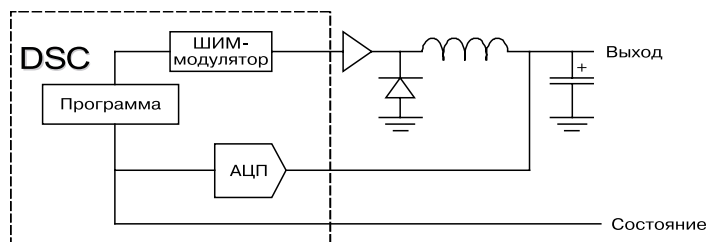


Рис. 1. Пример архитектуры цифровой управляющей цепи

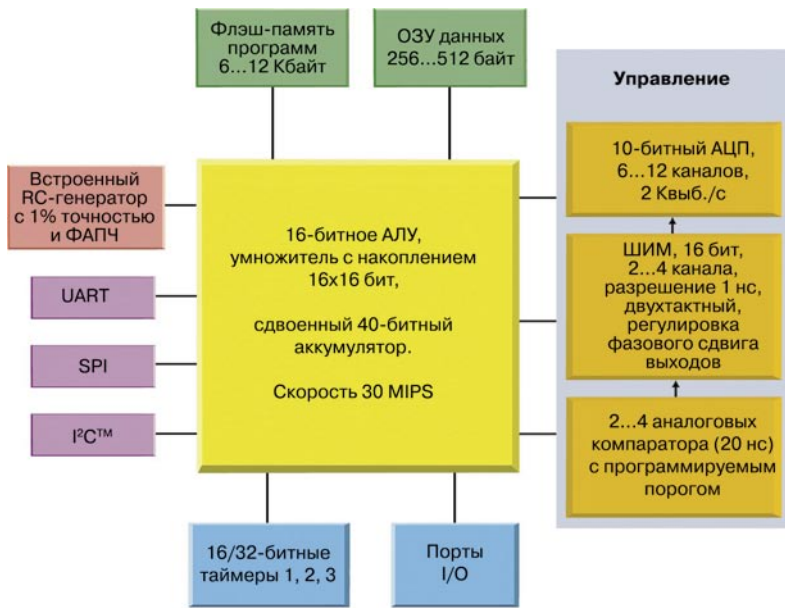


Рис. 2. Пример цифрового сигнального контроллера для источника питания

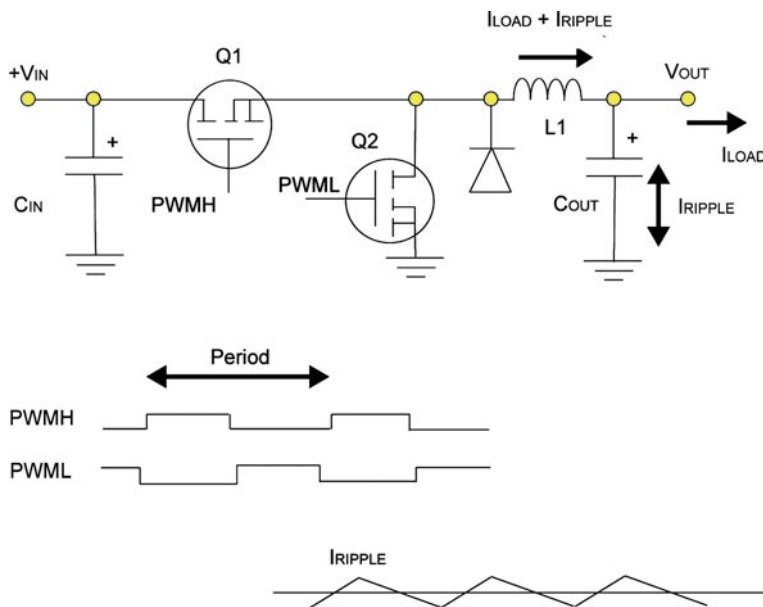


Рис. 3. Синхронный понижающий преобразователь

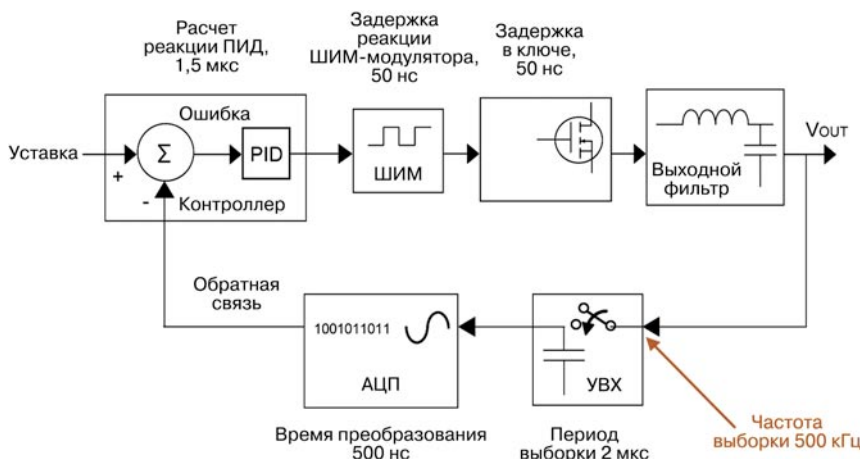


Рис. 4. Пример системы управления импульсным источником питания

лера. Контроллер, показанный на рисунке 2, содержит все необходимые узлы для такого источника питания и может работать от единственного источника входного напряжения, что существенно повышает надежность системы в целом.

В некоторых устройствах, например, в преобразователях переменного тока, этот контроллер может применяться и для управления преобразователем, и для управления коррекцией коэффициента мощности (ККМ). Цифровой характер ШИМ, позволяющий с легкостью добавлять новые функции, дает возможность сформировать комплементарные ШИМ-сигналы. Наличие свободного выхода ШИМ-сигнала и соответствующей программы позволяет отказаться от использования отдельной микросхемы корректора коэффициента мощности, что также увеличивает надежность.

РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Описанный далее пример цифровой системы управления показывает, как выбор ЦПОС и другие архитектурные особенности влияют на конструкцию. На рисунке 3 показан синхронный понижающий преобразователь, названный так из-за транзистора Q2, открывающего или закрывающего синхронно с транзистором Q1. Преимущество такого решения состоит в использовании в качестве выпрямителя МОП-транзистора с очень низким падением напряжения в открытом состоянии, что повышает общий КПД, однако требует наличия дополнительного ШИМ-сигнала, противофазного основному. При этом транзистор Q2 открывается при закрытии Q1 и наоборот. Это называется режимом комплементарной ШИМ.

На рисунке 4 показана блок-схема петли управления импульсного источника питания. Особо следует отметить наличие задержек, присущих каждому блоку. Периодичность взятия отсчетов схемой выборки/хранения обычно составляет от 2 до 10 мкс, а АЦП необходимо около 500 нс для преобразования аналогового сигнала ОС в цифровой.

Роль пропорционально-интегрально-дифференциального [ПИД] контроллера играет программа, выполняемая на цифровом сигнальном контроллере с суммарной задержкой в 1...2 мкс. Выходной сигнал контроллера преобразуется в ШИМ-сигнал, управляющий схемами переключения. Генератор ШИМ может внести существенную задержку, если он не способен немедленно отреагировать на изме-

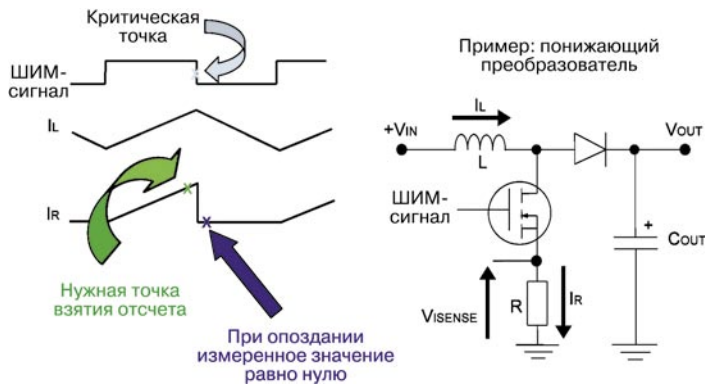


Рис. 5. Асинхронное управление выборкой АЦП

нение входного сигнала при начале нового цикла. Кроме того, в зависимости от использованных силовых транзисторов и конструкции переключающих схем вносимая ими временная задержка может составлять от 50 нс до 1 мкс. Значительную задержку может вносить и выходной фильтр, в состав которого обычно входят индуктивные и емкостные элементы.

Общая задержка в цепи обратной связи представляет собой сумму вышеперечисленных задержек и в данном случае составляет примерно 4,1 мкс. Реальная частота дискретизации обратно пропорциональна суммарной задержке и составляет 244 кГц.

Ширина полосы пропускания контроллера равняется реальной частоте дискретизации, деленной на коэффициент передискретизации. В большинстве случаев для сохранения стабильности системы этот коэффициент должен составлять от 6 до 10. В данном примере достаточно шестикратной передискретизации, что дает нам примерную полосу пропускания контроллера 40 кГц. Для увеличения быстродействия в стандартную программу ПИД-регулятора можно ввести выражения, реализующие алгоритм прямой связи.

РАЗРАБОТКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО И НАДЕЖНОГО ЦИФРОВОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Давайте на данном примере выясним, как выбранная архитектура схемы управления влияет на требования к отдельным узлам. Для предотвращения влияния на Работу контроллера дрожания широтно-модулированного сигнала частота перезаписи ШИМ-модулятора должна как минимум в четыре-пять раз превосходить полосу пропускания контроллера. В данном примере это отношение равно десяти, что соответствует частоте перезагру-

ки ШИ модулятора 400 кГц. Теперь, когда эта частота задана, можно рассчитать разрешающую способность ШИМ-модуля.

Многие производители и покупатели путаются в понятии «разрешающая способность ШИМ-модуля». Данное понятие характеризуется, скорее, не разрядностью счетчика, а количеством тактовых импульсов, отсчитанных им в течение одного периода ШИМ-сигнала. С точки зрения разработчиков источников питания разрешающая способность ШИМ определяется наименьшим временным интервалом, измеряемым в наносекундах, на который удастся изменить длительность импульса ШИМ. Если входящий в состав микросхемы ЦПОС ШИМ-модуль не обладает необходимой разрешающей способностью, система управления (реализованная аппаратно или программно) «размоет» выходной сигнал для достижения необходимого значения в среднем. В источниках питания такое дрожание ШИМ-сигнала может привести к проблеме пульсирующих токов и вызвать переход системы управления в нежелательный режим работы, называемый «предельным циклом».

$$\text{Разрешающая способность ШИМ} = \frac{\text{тактовая частота счетчика ШИМ}}{\text{частота ШИМ-сигнала}}$$

Задание частоты ШИМ-сигнала определяет необходимую разрешающую способность. Для данного примера разрешающая способность должна составлять примерно 11 бит, следовательно, тактовая частота ШИМ-модуля должна быть около 1 ГГц.

Программное обеспечение импульсных источников питания отвечает за выполнение управляющего алгоритма, ядром которого является ПИД-цикл. Программный код ПИД-функции обычно невелик — одна или две страницы кода — но скорость его

**ПАЯЛЬНОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ**

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН

www.chipdip.ru

В Интернете дешевле!

SLOMON

CTBRAND **ERSA**
GLOBAL CONNECTIONS

Доставка в любую точку России!

ЧИП И ДИП online

(495) 780-95-00

sales@chipdip.ru

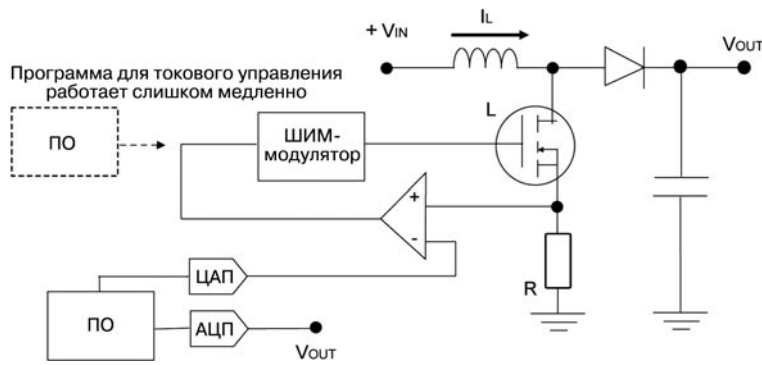


Рис. 6. Пример использования аналоговых компараторов для ограничения тока

выполнения очень велика — зачастую сотни тысяч итераций в секунду! Для достижения подобной скорости программный код ПИД-цикла должен быть как можно более эффективным. Использование ассемблера дает хорошую возможность для выполнения данных требований.

Время выполнения программного кода ПИД-функции определяет две вещи: скорость ПИД-итераций, которая, в свою очередь, задает время между управляющими циклами; и время выполнения ПИД вычислений, которое определяет задержку между выборкой значений сигнала с ветви обратной связи и поступлением сигнала на ШИМ модуль.

Цикл, управляющий ПИД-функцией, запускается в заданные моменты времени прерываниями с АЦП. Те системные функции, которые могут быть выполнены в режиме ожидания, должны быть вынесены за пределы ПИД-цикла. Это относится к формированию линейно нарастающего/падающего напряжения, обнаружению ошибок, вычислениям реакции прямой связи и подпрограммам передачи данных. Всем остальным процессам, управляемым прерываниями, например, передаче данных, должны присваиваться меньшие приоритеты, чем ПИД-циклу.

Для устранения потребности в сверхвысокоскоростных процессорах АЦП, используемый в цифровом источнике питания, должен обладать некоторыми специфическими свойствами. В описываемой системе петля управления организована так, что выборка сигнала определяется ШИМ-сигналом, т.е. система заранее знает, когда произвести выборку для получения наибольшего объема информации. Рисунок 5 иллюстрирует важность способности АЦП начинать преобразование точно в заданный момент времени.

Для уменьшения стоимости компонентов желательно измерять напря-

жения и/или тока в точках с близким к нулю потенциалом. Это позволяет избавиться от использования сложных и дорогих микросхем, способных работать при больших синфазных напряжениях, характерных для непосредственного измерения токов дросселя.

В данном примере ток дросселя протекает через открытый транзистор. Желательно проводить измерение пикового тока, который наблюдается как раз при закрытии транзистора. Если захват сигнала не удастся провести именно в этот момент (т.е. сигнал запуска выборки опоздает), транзистор закроется и, следовательно, ток не удастся измерить.

Как показано на рисунке 5, возможность асинхронного запуска выборки, когда АЦП может быть запущен не только в строго периодические моменты времени, очень важна. В цифровых импульсных источниках питания нужно, чтобы запуск захвата сигнала происходил точно в те моменты времени, которые определяются управляющим ШИМ-сигналом. Кроме того, необходимо наличие множества устройств выборки/хранения, так как они тогда могут управляться непосредственно сигналом ШИМ. Программное управление (в отличие от управления ШИМ-сигналом) не дает приемлемых результатов из-за временного разброса, вносимого программным обеспечением.

Использование аналоговых компараторов приносит дополнительные выгоды, реализовывать которые цифровым способом невозможно или непрактично. Причины этого таковы:

- АЦП не может непрерывно отслеживать сигналы;
- способность АЦП отслеживать сигналы ограничивается его скоростью. Если АЦП тратит все время на мониторинг какого-то одного сигнала, то он не сможет контролировать что-нибудь еще;

— отслеживание тока с помощью АЦП увеличивает задержку между измерением силы тока и реакцией ШИМ-сигнала (>300 нс). Использование аналоговых компараторов позволяет снизить эту задержку до приблизительно 25 нс;

— аналоговые компараторы обеспечивают не зависящее от процессорной части обнаружение перегрузки по току и/или напряжению;

— аналоговые компараторы позволяют реализовать токовый режим управления без использования программного обеспечения и АЦП.

Вообще говоря, наличие аналоговых компараторов, на базе которых реализуются ограничения тока и аварийное отключение, крайне желательно. На рисунке 6 приведен пример системы, использующей аналоговые компараторы для ограничения тока.

Важную роль играют и способы подключения аналоговых компараторов к цифровым преобразователям питания. К примеру, каждый аналоговый компаратор должен иметь собственный 10-битный ЦАП, задающий порог срабатывания компаратора. Источник опорного напряжения должен быть точным и стабильным, а компараторы должны обладать высоким быстродействием.

Типичное значение интервала между поступлением аналогового сигнала и изменением состояния выхода ШИМ-модулятора должно составлять примерно 20 нс, так как именно такая должна быть скорость реакции системы для обеспечения ограничения тока или аварийного отключения. Это время намного меньше, чем может обеспечить программный «опросный» подход, когда управление ШИМ-сигналом осуществляется на основании программной обработки оцифрованного АЦП сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одно из преимуществ использования цифровых технологий в источниках питания — это свобода, которую они предоставляют разработчикам при создании и защите интеллектуальной собственности. Разработчики, использующие новые, гибкие цифровые сигнальные контроллеры при создании источников питания, обнаруживают, что они могут реализовать совершенно новые топологии и алгоритмы управления, причем они могут быть быстро и тщательно оттестированы, так как реализованы в большей степени программно, чем аппаратно.