

# Микроконтроллеры Microchip В ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

**Сегодня импульсные источники вторичного электропитания практически вытеснили линейные и занимают около 90% рынка. В статье описаны возможности использования независимых от ядра периферии младших семейств микроконтроллеров компании Microchip Technology для построения импульсных источников питания на примере драйвера светодиодной лампы. Статья предназначена для специалистов в области создания преобразователей энергии и дает представление о возможностях современных цифровых программируемых микроконтроллеров в традиционной аналоговой сфере.**

Илья АФАНАСЬЕВ

Традиционно импульсные источники питания (ИИП) строятся на импульсных ШИМ-контроллерах и имеют аналоговую обратную связь. При необходимости добавления интеллекта устанавливаются микроконтроллеры (МК), выполняющие минимальные функции управления: вкл./выкл., плавный пуск, контроль работоспособности, индикация режимов и т. п.

Такой принцип построения ИИП отработан годами, и проектировщики аналоговых схем допускают минимальное вмешательство «цифровых» инженеров в свою вотчину.

Недостатком аналоговых ИИП является малая универсальность и гибкость — для изменения параметров нужен паяльник или подстроечные элементы. При выпуске однотипных источников, имеющих близкие характеристики, необходимо иметь набор решений, что затрудняет настройку, усложняет логистику и увеличивает складские расходы.

Режимы работы и топология аналоговых импульсных контроллеров определены применяемыми микросхемами. При разработке микросхем производители ориентируются на распространенные топологии, чтобы новинка сразу нашла свою нишу. Создание новых топологий и решений в ИИП и нужных для этого микросхем напоминает проблему курицы и яйца: новые ШИМ-контроллеры не появляются, пока для них нет рынка, а рынок не хочет разрабатывать новые типы ИИП на нескольких микросхемах, пока не появится одна специализированная микросхема.

Программируемые решения помогают разрешить данную коллизию. Изменения параметров цифрового источника не требуют изменения компонентов — достаточно изменить код в памяти программ. Параметры цифровых ИИП имеют лучшие показатели по эффективности, легко корректируются, а также возможно снижение номенклатуры решений и выпуск одинаковых плат с разными характеристика-

ми, изменяемыми программно. Цифровые ИИП трудно скопировать, поскольку интеллектуальная собственность заключена не в топологии платы, а в алгоритмах прошивки микроконтроллера.

Но цифровое построение ИИП, с одной стороны, предполагает знания и опыт создания силовой и/или высоковольтной электроники, а с другой — программирование цифровых сигнальных контроллеров или микроконтроллеров. Кроме того, полностью цифровой ИИП предполагает наличие высокоскоростной периферии, чтобы свести к минимуму ошибки и задержки петли обратной связи (необходим быстрый и точный АЦП, высокочастотный ШИМ, высокопроизводительное ядро и т. д.). Именно для таких источников питания Microchip выпускает специализированные контроллеры цифровой обработки сигналов серии dsPIC33xxGS.

Промежуточный уровень интеграции микроконтроллера в ИИП подразумевает аналоговое построение петли обратной связи, но с высокой степенью влияния МК на контроль и управление параметрами источника — выходным напряжением и током, а также ограничениями по току, напряжению и температуре.

## Теория

Рассмотрим пример классической реализации обратногоходового (Flyback) преобразователя, показанного на рис. 1 [1].

Несмотря на то, что обратногоходовая топология отличается несколько меньшей эффективностью, она остается весьма популярной благодаря обеспечению электрической изоляции и возможности формирования нескольких выходных напряжений.

Транзистор работает в ключевом режиме и управляется широтно-модулированными импульсами (ШИМ). При открытом транзисторе ток в первичной обмотке начинает линейно нарастать (рис. 2). В этой фазе происходит накопление энергии в трансформаторе. Во вторичной обмотке тока нет, поскольку диод блокирует его протекание.

При выключении транзистора прекращается протекание тока в первичной обмотке, напряжение на вторичной обмотке  $V_2$  равно напряжению в первичной обмотке  $V_1$  (по закону электромагнитной индукции Фарадея). Накопленная энергия передается во вторичную обмотку трансформатора. Диод начинает проводить ток, и энергия вторичной обмотки передается в выходной конденсатор. Ток вторичной обмотки  $I_2$  линейно уменьшается.

Трансформатор в обратногоходовых источниках выполняет функцию накопления энергии, и сердечник должен быть с зазором.

Обратногоходовой преобразователь может работать в режимах прерывистой или непрерывной проводимости в зависимости от того, есть ли

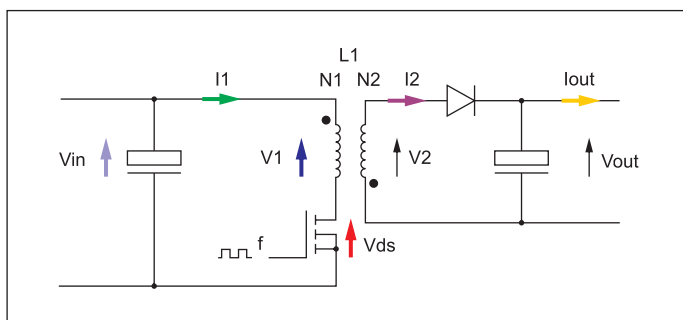


Рис. 1. Обратногоходовой преобразователь энергии

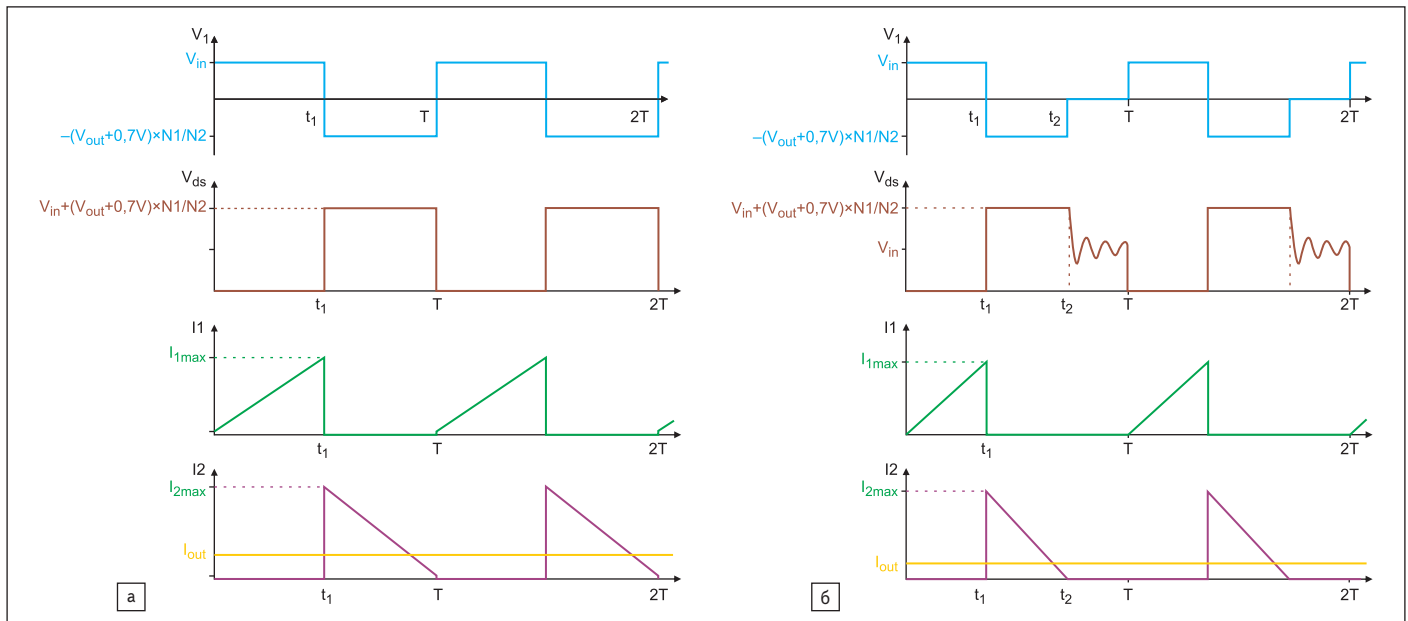


Рис. 2. а) Обратногоходовой преобразователь в режиме непрерывной (критической) проводимости; б) обратногоходовой преобразователь в режиме прерывистой проводимости

моменты времени, когда одновременно отсутствует ток через первичную и вторичную обмотки трансформатора (рис. 2а, б). В режиме критической проводимости транзистор управляется таким образом, чтобы он открывался, как только ток во вторичной обмотке становится равен нулю и в трансформаторе нет накопленной энергии. В этом режиме преобразователи имеют меньшие потери в силовом ключе.

Существует масса специализированных аналоговых ШИМ-контроллеров различных производителей, позволяющих построить обратногоходовой преобразователь. Но для введения интеллектуальных функций управления необходим внешний микроконтроллер. Так, в схеме, приведенной на рис. 3, можно управлять источником с помощью ШИМ-сигнала на входе PWM.

Возможно ли совместить интеллект микроконтроллера и аналоговый ШИМ-контроллер в одной микросхеме? Да.

Микроконтроллеры Microchip младших семейств (PIC12, PIC16) позволяют синтезировать необходимую конфигурацию независимой от ядра периферии для создания ИИП. Первоначально программа микроконтроллера конфигурирует работу периферийных модулей, которые в дальнейшем действуют без вмешательства программы, но при необходимости программа может управлять параметрами преобразователя.

К независимой от ядра периферии, помогающей построить ИИП, относятся:

- генератор комплементарных сигналов (Complementary Output waveform Generator — COG);

- детектор перехода через ноль (Zero Cross Detect — ZCD);
- формирователь корректирующего напряжения (Slope Compensator и Ramp Generator);
- таймер ограничений (Hardware Limit Timer — HLT);
- операционный усилитель;
- быстрые аналоговые компараторы;
- модули конфигурируемой логики (CLC — Configurable Logic cell).

Другая периферия, такая как порты ввода/вывода, источник фиксированного напряжения (Fixed Voltage Reference — FVR), ЦАП, АЦП, таймеры, модуль сравнения/захвата/ШИМ, позволяет микроконтроллеру управлять ИИП с минимальными программными издержками.

Рассмотрим реализацию диммируемого обратногоходовой светодиодного AC/DC-драйвера с активным корректором мощности на микроконтроллере PIC12F752 (рис. 4), полная схема приведена в [3].

В предлагаемом решении используется традиционный обратногоходовой преобразователь, за исключением высоковольтного электролитического конденсатора после выпрямителя. Подобное решение дешевле и компактнее, а кроме того, оно позволяет аппаратно следить за входным напряжением и за счет этого обеспечить две функции:

- 1) определять наличие внешнего симисторного диммирования и, соответственно, регулировать выходной ток преобразователя;
- 2) использовать форму входного напряжения для управления током и обеспечения высокого коэффициента мощности преобразователя.

Микроконтроллер PIC12HV752 является основой драйвера и поддерживает работу преобразователя. Генератор комплементарных сигналов формирует импульсный сигнал (ИС),

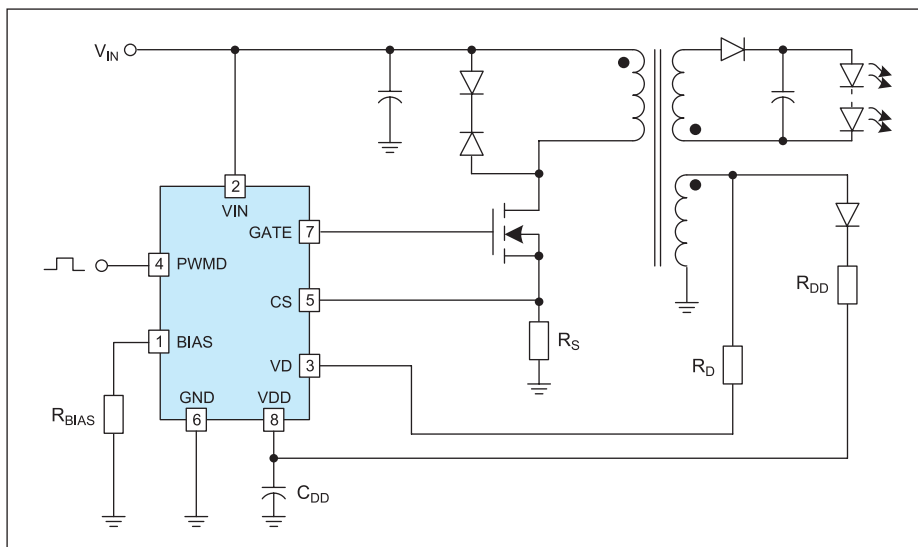


Рис. 3. Пример обратногоходовой светодиодного драйвера

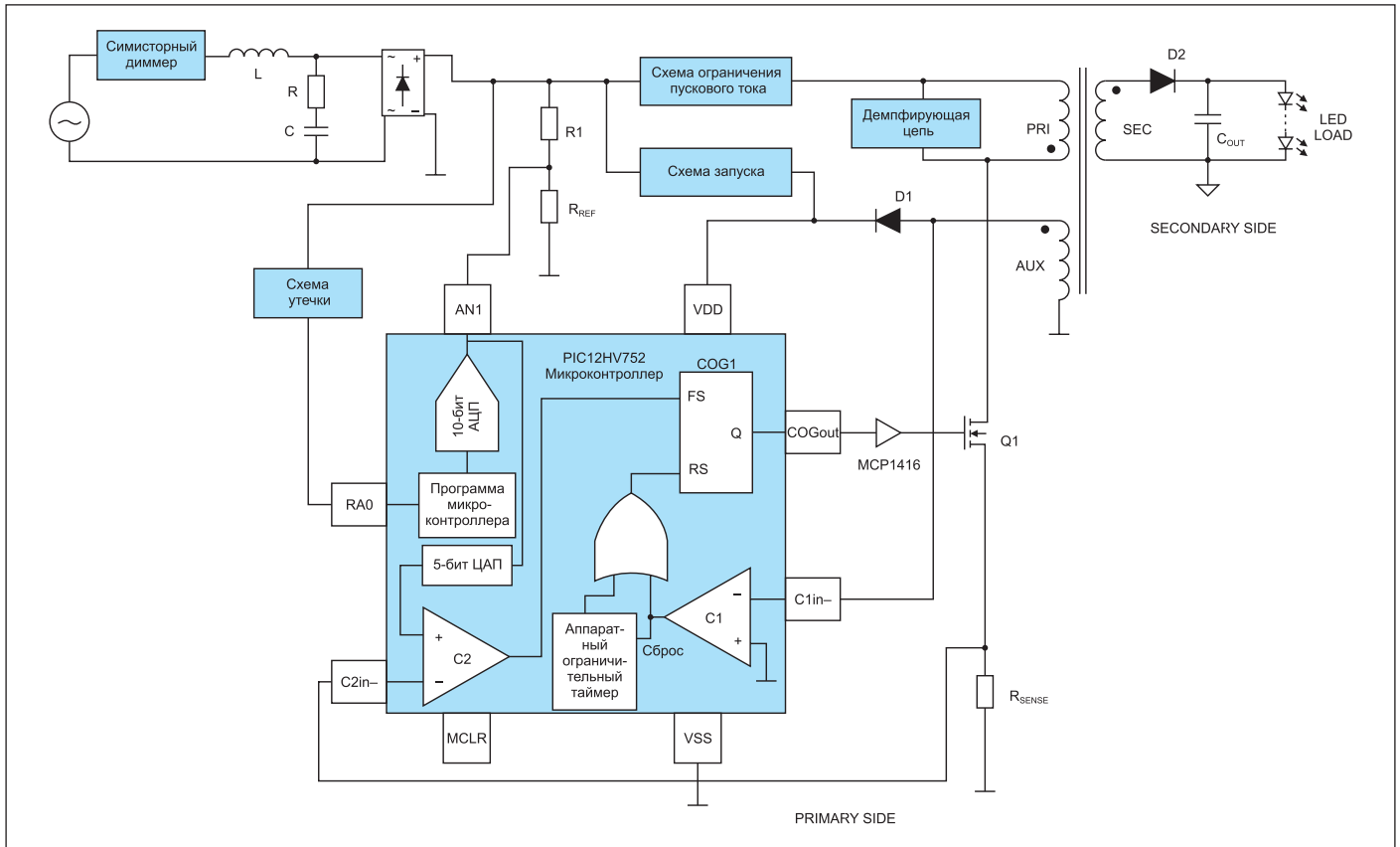


Рис. 4. Функциональная схема микроконтроллерного обратногоходового светодиодного драйвера

который управляет включением и выключением силового MOSFET Q1. Фронт ИС контролируется компаратором C1 и аппаратным ограничительным таймером (HLT), а спад формируется вторым компаратором C2. На вход компаратора C1 поступает напряжение со вспомогательной обмотки (AUX) трансформатора T1, и компаратор детектирует переход через ноль напряжения  $V_{aux}$ . На вход компаратора C2 подается напряжение с токового шунта  $R_{sense}$ , которое сравнивается с напряжением выхода ЦАП. Напряжение на выходе ЦАП определяется его опорным напряжением  $V_{ref}$  (вывод AN1), которое берется с делителя опорного напряжения. Ключевое достоинство такой схемы — аппаратная реализация корректора коэффициента мощности, так как огибающая тока (сигнал с  $R_{sense}$ ) будет повторять форму входного напряжения (опора ЦАП представляет собой половину сетевого напряжения).

**Схема запуска**

При подаче внешнего переменного напряжения напряжение на базе транзистора Q4 увеличивается, транзистор открывается и питание МК осуществляется через диод D14 (рис. 5).

Напряжение на базе Q4 удерживается на уровне 10 В с помощью стабилитрона D13. Когда транзистор открывается, то появляется напряжение питания микроконтроллера  $V_{dd}$  (микроконтроллеры серии PIC12HV имеют встроенный шунт-регулятор и позволяют питаться от высокого напряжения). При запуске микроконтроллера стартует программа, инициализируется независимая от ядра периферия (HLT, COG, ЦАП, АЦП и компараторы). Затем HLT инициирует импульсы управления силовым ключом Q1. Это приводит к накачке трансформатора T1 и формированию напряжения  $V_{AUX}$ . Как только выпрямленное с помощью D4 напряжение  $V_{AUX}$  превысит 10 В, диод D14 будет обратно смещен и транзистор Q4 закроется, что прекратит потребление тока схемы запуска и питания от высокого напряжения. Теперь напряжение питания микроконтроллера будет поступать от вспомогательной обмотки трансформатора.

Важно, чтобы при работе источника формируемое напряжение  $V_{AUX}$  было больше, чем на эмиттере Q4, тогда транзистор Q4 закрыт и схема запуска источника не потребляет ток.

**Работа в установившемся режиме**

Как отмечалось ранее в описании принципа работы обратных преобразователей, когда транзистор Q1 открыт, ток в обмотке  $I_{LP}$  увеличивается линейно. Этот ток вызывает падение напряжения на резисторе  $R_{sense}$ . Напряжение  $R_{sense}$  сравнивается компаратором C2 с напряжением на выходе ЦАП (задается точка срабатывания по пиковому току).

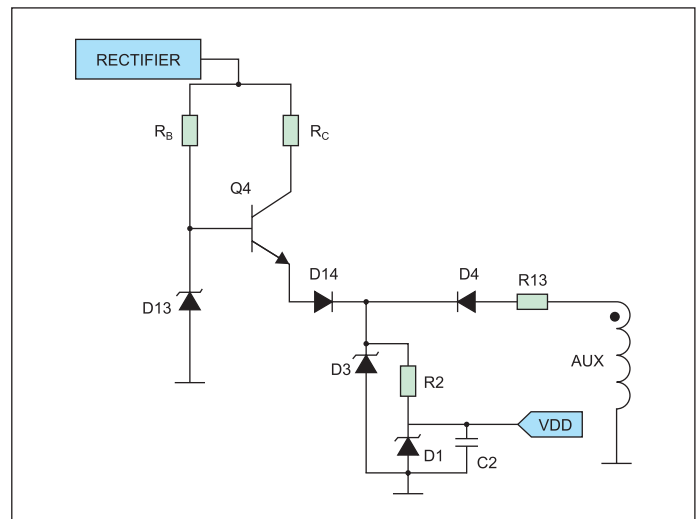


Рис. 5. Схема запуска и питания драйвера

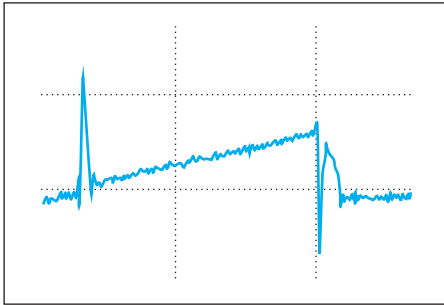


Рис. 6. Помехи от переключения силового ключа влияют на входной сигнал компаратора

Переключение транзистора Q1 обычно сопровождается импульсными помехами, влияющими на форму напряжения  $V_{SENSE}$  (рис. 6). Для предотвращения влияния этих помех на работу модуля COG за счет ложных срабатываний компаратора используется таймер гашения (маскирования) сигнала компаратора (comparator blanking timer) на программируемое число циклов после переключения.

Когда напряжение  $V_{SENSE}$  достигает уровня  $V_{DAC}$ , компаратор сбрасывает COG и таймер ограничения HLT. Если же по какой-то причине сигнал обратной связи не поступает

вовремя, то ограничительный таймер срабатывает и выключает силовой ключ.

Когда транзистор Q1 закрыт, ток вторичной обмотки  $I_{LS}$  линейно уменьшается. Как уже отмечалось, режим критической проводимости характеризуется меньшими потерями в силовом ключе и обладает большей эффективностью. Для удержания преобразователя в этом режиме транзистор Q1 должен быть снова открыт, когда ток  $I_{LS}$  достигнет нуля. Этот момент можно определить с помощью компаратора C1 по значению напряжения  $V_{AUX}$  на дополнительной обмотке. На рис. 7 показаны временные диаграммы, поясняющие работу источника питания.

### Активный корректор мощности

Средний входной ток может быть рассчитан как площадь под формой тока  $I_{LP}$ . Этот ток синусоидальный и находится в фазе с входным напряжением  $V_{IN}$  за счет того, что порог срабатывания компаратора задается с помощью ЦАП, опоры которого берется от входного напряжения. В результате светодиодный драйвер выглядит как резистивная нагрузка и имеет коэффициент мощности, близкий к единице (рис. 8).

### Внешнее диммирование

Если питание драйвера осуществляется с тиристорного диммера, то микроконтроллер с помощью АЦП (вход AN1) может это определить и осуществить регулировку выходного тока драйвера светодиодов с помощью изменения коэффициента передачи ЦАП; подключать нагрузку, создающую необходимый удерживающий ток симистора для предотвращения мерцания светодиодной лампы при малой скважности диммера.

### Вспомогательные схемы

На рис. 4 помимо основных представленные и дополнительные блоки, призванные улучшить параметры драйвера и надежность схемы.

#### Схема ограничения пускового тока (Inrush current circuit)

Защищает компоненты первичной цепи от выбросов тока. Эти всплески тока возникают, когда закрывается внешний диммирующий симистор (при его наличии).

#### Схема утечки (bleeder circuit)

Такая схема необходима для потребления дополнительного тока, чтобы удерживать в открытом состоянии внешний симистор при низком входном напряжении. Симистору нужен небольшой ток в нагрузке для удержания его в открытом состоянии и предотвращения самовыключения. Схема состоит из резистора и биполярного транзистора, который открывается микроконтроллером только тогда, когда

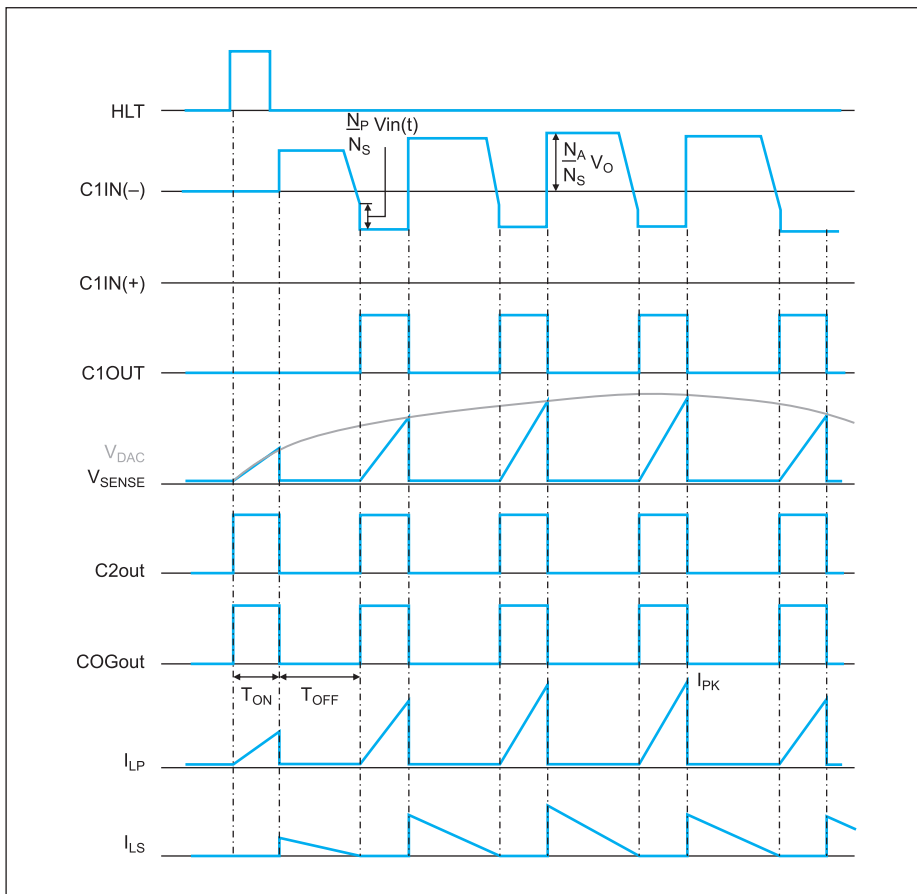


Рис. 7. Формы токов и напряжений в источнике питания

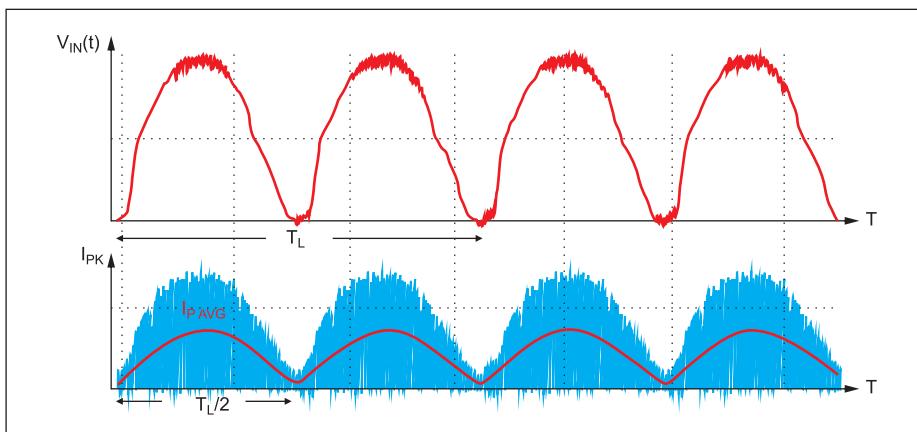


Рис. 8. Форма напряжения и тока

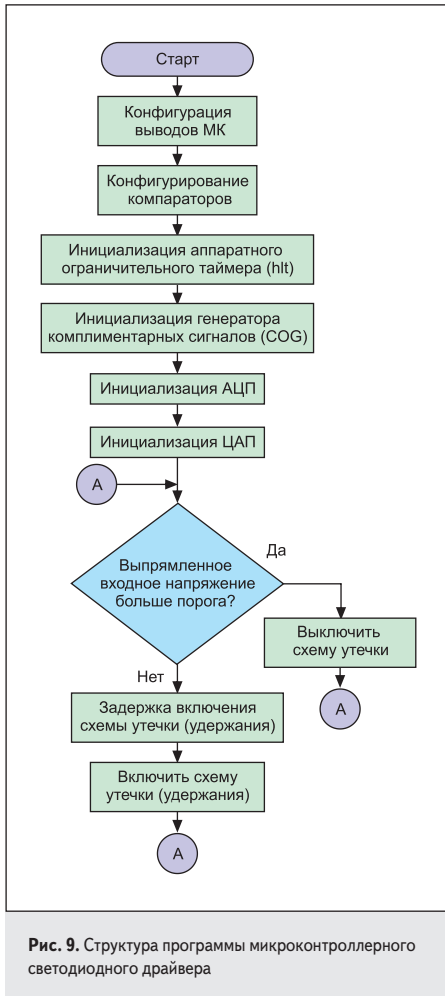


Рис. 9. Структура программы микроконтроллерного светодиодного драйвера

напряжение после диодного моста мало (определяется с помощью АЦП). Когда напряжение выше определенного порога, транзистор закрывается и схема не потребляет ток.

При отсутствии данной схемы и малой скважности диммированного сетевого напряжения, из-за малого потребления схемы светодиодного светильника, симистор будет неконтролируемо выключаться и светодиодная лампа начнет моргать.

**Демпфирующая цепь (snubber circuit)**

Используется для защиты транзистора Q1 от бросков напряжения. Индуктивность рассеяния трансформатора приводит к существенному выбросу напряжения на разомкнувшемся силовом ключе. Демпфирующая цепь призвана рассеять энергию и уменьшить выброс напряжения. Схема содержит быстрый переключающий диод, последовательно соединенный с параллельно включенными резистором и конденсатором. Иногда применяют дополнительный стабилитрон для минимизации потерь мощности при малых нагрузках.

**Программа микроконтроллера**

Алгоритм программы, обеспечивающей работу преобразователя, приведен на рис. 9. При использовании независимой от ядра периферии основная цель программы — инициализация.

Выводы микроконтроллера конфигурируются в соответствии с выполняемыми функциями. После конфигурации портов ввода/вывода конфигурируется и включается необходимая периферия, устанавливаются внутренние связи между периферией.

АЦП определяет наличие внешнего симисторного диммирования. Если напряжение превышает минимальное значение для удержания симистора, то отключается цепь утечки, иначе — включается.

**Используемые периферийные модули микроконтроллера**

Основная цель формирователя комплементарных сигналов (Complementary Output Generator, COG) — преобразование нескольких внешних событий в один ШИМ-выход. Модуль COG использует различные входные, выходные или внутренние события для формирования импульсного сигнала. Событиями выступают фронт, спад или логические состояния сигналов. В качестве входных сигналов COG могут выступать сигналы модулей захвата/сравнения/ШИМ, компараторов, таймеров или входы микроконтроллера. COG может формировать одиночный, пушпульный или комплементарные сигналы, с отдельным регулированием мертвого, маскирующего времени и фазовых сдвигов.

Для выбранной топологии источника для управления силовым ключом с помощью COG используются сигналы двух компараторов и ограничительный таймер HLT.

Во время переключения силового ключа возникают помехи, которые могут привести к ложным срабатываниям компаратора. Для предотвращения этого предусмотрена возможность маскирования — невосприимчивость COG к событиям в течение заданного времени после переключения состояния. Внутренний генератор микроконтроллера PIC12HV752 работает на частоте 8 МГц, что дает возможность регулировать время бланкирования с шагом в 125 нс отдельно для включения и выключения COG.

Основное назначение таймера ограничительных (Hardware Limit Timer, HLT) — ограничить время ожидания события, что может использоваться в приложениях с асинхронной аналоговой обратной связью. Например, если приложение ожидает внешнего события, но оно не наступает в заданном временном интервале, то HLT может являться источником сброса события.

Применительно к нашей задаче: если нет сигнала обратной связи от компаратора, то HLT ограничивает время открытого состояния силового MOSFET и предотвращает выход силовой части из строя. Если же источник работает в нормальном режиме, сигнал компаратора появляется раньше срабатывания HLT и меняет состояние модуля COG.

Можно привести аналогию со сторожевым таймером микроконтроллера, только HLT

ограничивает не программный цикл выполнения кода, а время ожидания входного сигнала для периферии и сбрасывает эту периферию в predetermined состояние.

Компараторы применяются для связи аналоговой части схемы с цифровой и выдачи сигналов управления для COG-генератора, тем самым компараторы служат для замыкания петли обратной связи в нашем преобразователе энергии. Посредством модуля COG выходы компараторов формируют управляемый аналоговыми сигналами ШИМ-подобный сигнал. Выход компаратора C1 управляет включением MOSFET, а выход компаратора C2 — его выключением. Два компаратора в рассматриваемом решении выступают в роли детектора пикового тока и детектора перехода через ноль. Также выход компаратора C1 сбрасывает HLT при работе источника.

Модуль цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) используется для преобразования напряжения с выхода диодного моста (опора ЦАП подключена к входу AN1) и управления огибающей формы тока. Выход ЦАП соединен с входом компаратора C2 внутри МК — таким образом, огибающая пиков тока будет повторять форму входного напряжения и данная схема будет обеспечивать близкий к единице коэффициент мощности. Изменение коэффициента передачи (ЦАП представляет собой резистивный делитель с отводами) будет изменять выходной ток источника. Поэтому программа микроконтроллера может регулировать яркость лампы в зависимости от различных условий.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует аналоговое входное напряжение в цифровой вид. В рассматриваемом источнике АЦП измеряет напряжение на выходе диодного моста и позволяет удерживать ток симистора (при наличии внешнего диммирования) при малых уровнях входного напряжения (около моментов перехода сетевого напряжения через ноль) с помощью переключения состояния вывода RA0 (рис. 4).

**Возможные улучшения дизайна**

Применение микроконтроллера в качестве основного компонента источника питания позволяет добавить интеллектуальные функции и совместить ШИМ-контроллер источника питания с управляющим микроконтроллером. В одной микросхеме можно реализовать плавное включение, добавить управляющие интерфейсы, диагностические режимы, обработку сигналов внешних датчиков, режимы энергосбережения.

Если для решения конкретных задач не хватает выводов микроконтроллера, то схема легко расширяется: микроконтроллер PIC12F752 можно заменить 14-выводной версией PIC16F753 — при этом увеличивается размер памяти, добавляются 6 портов

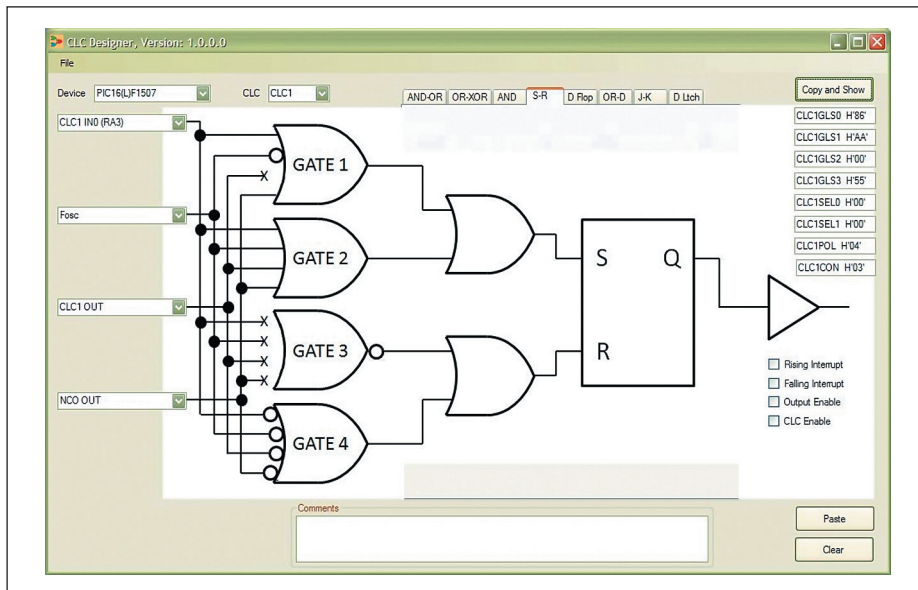


Рис. 10. Окно утилиты конфигурирования логических ячеек микроконтроллеров Microchip

Таблица. Некоторые PIC-микроконтроллеры с периферией, пригодной для использования в преобразователях энергии

Семейство	АЦП, бит	Компаратор	Оп. усилитель	ЦАП, бит	I/O, мА	SlopeComp.	ZCD	ШИМ, бит	PSMC	COG	HLT	CLC (логические ячейки)
PIC1x(L)F150x	10	+		5	25			10				+
PIC1x(L)F157x	10	+		5	25			16				
PIC1x(HV)F752/753	10	Быстр.	+	5/9	50	+		10		+	+	
PIC16(L)F161x	10	+		8	100		+	10			+	+
PIC16(L)F170x/1x	10	Быстр.	+	5/8	25		+	10		+	+	+
PIC16(L)F176x	10	Быстр.	+	5/10	100	+	+	16		++	+	+
PIC16(L)F177x	10	Быстр.	+	5/10	100		+	16		+	+	+
PIC16(L)F178x	12	Быстр.	+	5/8	25			10	+			

входа/выхода, операционный усилитель, число каналов АЦП и разрядность ЦАП.

При необходимости алгоритм и независимая от ядра периферия перестраиваются под другую топологию источника питания без замены микросхемы. Выходной ток регулируется не внешними элементами схемы, а программно.

Энергонезависимая память микроконтроллера позволяет хранить и использовать на-

строечные параметры под разные варианты источника (варианты выходного тока и пр.).

Микроконтроллеры PIC12F752/PIC16F753 не единственные представители младшего семейства, периферия которых предназначена в том числе для использования в преобразователях энергии. В таблице приведены некоторые PIC-микроконтроллеры, чья периферия может облегчить построение преобразователей энергии.

В простейшем случае импульсный контроллер можно синтезировать с помощью программируемых логических ячеек из набора элементов комбинационной логики и триггеров (рис. 10).

Недавно начато массовое производство микроконтроллеров семейства PIC16(L)F1769, представители которых имеют периферию, позволяющую создавать два независимых или двухстадийных преобразователя энергии.

Независимая от ядра периферия позволяет применять микроконтроллеры в различных задачах преобразования энергии. На сайте компании Microchip представлено несколько дизайн-проектов: цифровой балласт электролюминесцентных ламп с интерфейсом DALI, контроллер солнечной панели с контролем точки максимальной мощности (Maximum Power Point Tracking, MPPT), контроллер сигнала пешеходного перехода с питанием от солнечных батарей, светодиодный фонарь и другие устройства. Применение микроконтроллеров позволяет добавлять новые качества в импульсные преобразователи энергии — гибкость управления, интеллектуальность, интерфейсы связи, диагностики, а также иные возможности, недоступные или сложно реализуемые в полностью аналоговых решениях. Конфигурируемая и независимая от ядра периферия позволяет создавать и исследовать новые топологии ИИП, под которые еще не созданы специализированные микросхемы.

## Литература

1. [www.schmidt-walter-schaltnetzteile.de](http://www.schmidt-walter-schaltnetzteile.de)
2. AN1271. Offline Power Converter for High-Brightness LEDs Using the PIC16HV785 Microcontroller. [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
3. TB3108. TRIAC Dimmable LED Driver Using PIC12HV752. [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
4. PIC12F752/HV752 Data Sheet (DS41576). [www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41576C.pdf](http://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41576C.pdf)
5. AN1427. High-Efficiency Solutions for Portable LED Lighting. [www.microchip.com](http://www.microchip.com)