

# Эффективное применение понижающих преобразователей постоянного тока производства компании Analog Devices

Смартфоны, планшетные ПК, цифровые фотоаппараты, навигаторы, медицинское оборудование и другие портативные устройства с малым энергопотреблением часто состоят из большого количества интегральных схем, изготавливаемых по разным технологиям. Для их работы, как правило, требуется несколько независимых напряжений питания, каждое из которых обычно отличается от напряжения автономного аккумулятора или внешнего источника питания. Рабочее выходное напряжение аккумулятора варьируется в диапазоне от 3 до 4,2 В, в то время как для работы ИМС требуются напряжения 0,8, 1,8, 2,5 и 2,8 В. Простой способ получения меньшего постоянного напряжения из напряжения аккумулятора заключается в применении стабилизатора с малым падением напряжения (low-dropout regulator, LDO) [1]. К сожалению, часть мощности при этом рассеивается в виде тепла, что делает стабилизаторы с малым падением напряжения неэффективными, когда  $V_{IN}$  намного больше  $V_{OUT}$ .

Кен МАРАСКО (Ken MARASCO)

## Введение

Альтернативой таким стабилизаторам является импульсный преобразователь, который поочередно запасает энергию в магнитном поле катушки индуктивности и высвобождает энергию, выдавая ее в нагрузку при другом значении напряжения. Меньшие потери данного типа преобразователя позволяют достичь высокого КПД. Понижающие

преобразователи, рассматриваемые в этой статье, выдают напряжение ниже входного. Повышающие преобразователи, о которых будет рассказано в следующей статье, обеспечивают напряжение выше входного.

Импульсные преобразователи, имеющие внутренние ключи на полевых транзисторах, называются регуляторами [2], а устройства, для которых необходимы внешние полевые транзисторы, — контроллерами импульсных

преобразователей [3]. В большинстве систем с малым энергопотреблением для достижения рационального соотношения стоимости и характеристик используются как преобразователи с малым падением напряжения, так и импульсные преобразователи.

На рис. 1 приведена упрощенная топология понижающего импульсного преобразователя (для случая включенного режима широтно-импульсной модуляции (ШИМ, PWM) — верхняя часть рисунка, и при выключенном режиме PWM — нижняя часть рисунка), а также временные диаграммы, поясняющие его работу. Понижающие импульсные преобразователи состоят из двух ключей, двух конденсаторов и катушки индуктивности. Во избежание нежелательного «сквозного» тока управление ключами осуществляется таким образом, что лишь один из них активен в отдельно взятый момент времени.

В фазе 1 ключ В разомкнут, а ключ А замкнут. Катушка индуктивности подключена к  $V_{IN}$ , и ток протекает от  $V_{IN}$  в нагрузку. Поскольку напряжение на катушке индуктивности имеет положительную полярность, ток возрастает. В фазе 2 ключ А разомкнут, а ключ В замкнут. Катушка индуктивности подключена к «земле», и ток протекает от «земли» к нагрузке. Поскольку напряжение на катушке индуктивности отрицательно, ток убывает, и энергия, запасенная в катушке индуктивности, передается в нагрузку.

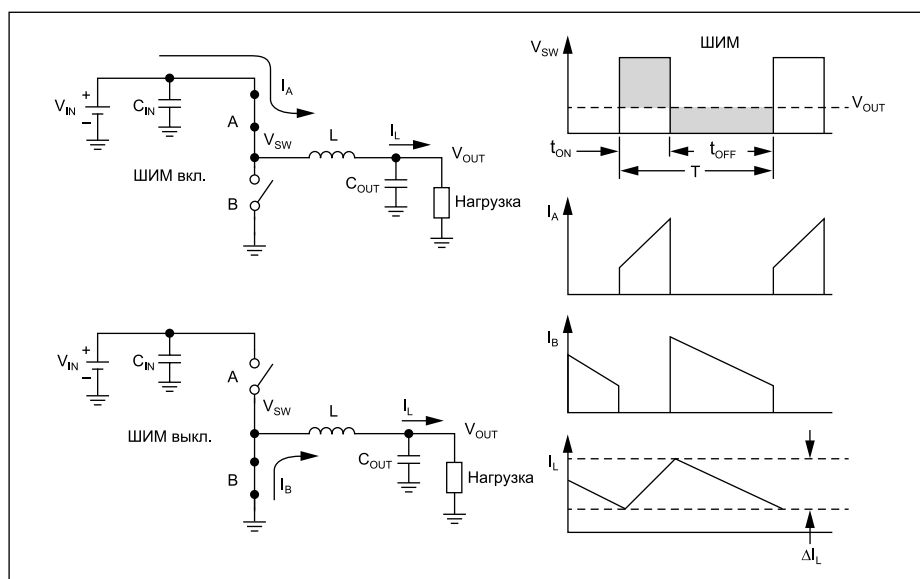


Рис. 1. Топология импульсного понижающего преобразователя и его временные диаграммы

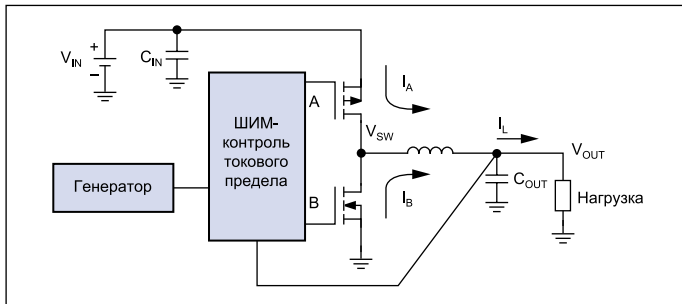


Рис. 2. Понижающий импульсный преобразователь включает в себя генератор, контур управления с ШИМ и коммутируемые полевые транзисторы

Импульсный преобразователь может работать в непрерывном или прерывистом режиме. При работе в непрерывном режиме (continuous conduction mode, CCM) ток через катушку индуктивности никогда не падает до нуля. При работе в прерывистом режиме (discontinuous conduction mode, DCM) ток через катушку индуктивности может падать до нуля. Маломощные понижающие импульсные преобразователи редко работают в режиме DCM. Уровень пульсаций тока, обозначенный на рис. 1 как  $\Delta I_L$ , обычно выбирается при проектировании в пределах от 20 до 50% от номинального тока нагрузки.

В схеме на рис. 2 ключи А и В реализованы на полевых транзисторах с каналами  $p$ - и  $n$ -типа соответственно, образуя синхронный импульсный понижающий преобразователь.

Термин «синхронный» означает, что в качестве нижнего ключа используется полевой транзистор. Понижающие стабилизаторы, в которых в качестве нижнего ключа используется диод Шоттки, называются асинхронными. Синхронные понижающие импульсные преобразователи более эффективны в малопотребляющих схемах, поскольку полевой транзистор имеет меньшее падение напряжения по сравнению с диодом Шоттки. В то же время если нижний полевой транзистор не отключается при падении тока через катушку индуктивности до нуля, то КПД

синхронного преобразователя при небольшой нагрузке упадет, а дополнительная схема управления повышает стоимость и сложность ИМС.

Основным рабочим режимом в современных синхронных импульсных понижающих преобразователях с малым энергопотреблением является режим широтно-импульсной модуляции (pulse-width modulation, PWM, ШИМ). При ШИМ частота импульсов поддерживается постоянной, а их ширина ( $t_{ON}$ ) изменяется для регулировки выходного напряжения. Средняя мощность, выдаваемая в нагрузку, пропорциональна коэффициенту заполнения импульсной последовательности:

$$D = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \approx \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

Контроллер ШИМ управляет ключами на полевых транзисторах, используя обратную связь по току или по напряжению в контуре управления для стабилизации выходного напряжения в ответ на изменение условий нагрузки. Понижающие импульсные преобразователи с малым энергопотреблением обычно имеют частоту коммутации от 1 до 6 МГц. Работа на высокой частоте коммутации позволяет использовать катушки индуктивности меньших габаритов, однако при каждом удвоении частоты коммутации

КПД падает примерно на 2%. При небольших нагрузках работа в режиме ШИМ не всегда дает повышение КПД системы.

Рассмотрим в качестве примера схему питания для графического адаптера. По мере изменения видеоизображения меняется и ток нагрузки понижающего импульсного преобразователя, от которого питается графический процессор. В непрерывном режиме ШИМ преобразователь может работать с широким диапазоном токов нагрузки, однако при небольших нагрузках КПД быстро падает, поскольку процентное отношение мощности, потребляемой преобразователем, к полной мощности, отдаваемой в нагрузку, возрастает. В понижающих импульсных стабилизаторах, применяемых в портативных системах, реализуются дополнительные методы уменьшения энергопотребления, такие как частотно-импульсная модуляция (pulse-frequency modulation, PFM), пропуск импульсов или комбинация этих двух методов.

Компания Analog Devices использует для обозначения режима эффективной работы при небольших нагрузках термин «режим энергосбережения» (power-save mode, PSM). При входе в этот режим производится сдвиг уровня стабилизации ШИМ, что приводит к нарастанию выходного напряжения. Выходное напряжение растет до тех пор, пока оно не превысит уровень стабилизации при-

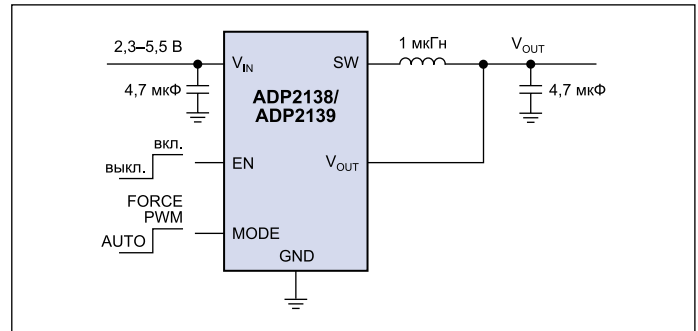


Рис. 3. Типичная схема применения ADP2138/ADP2139

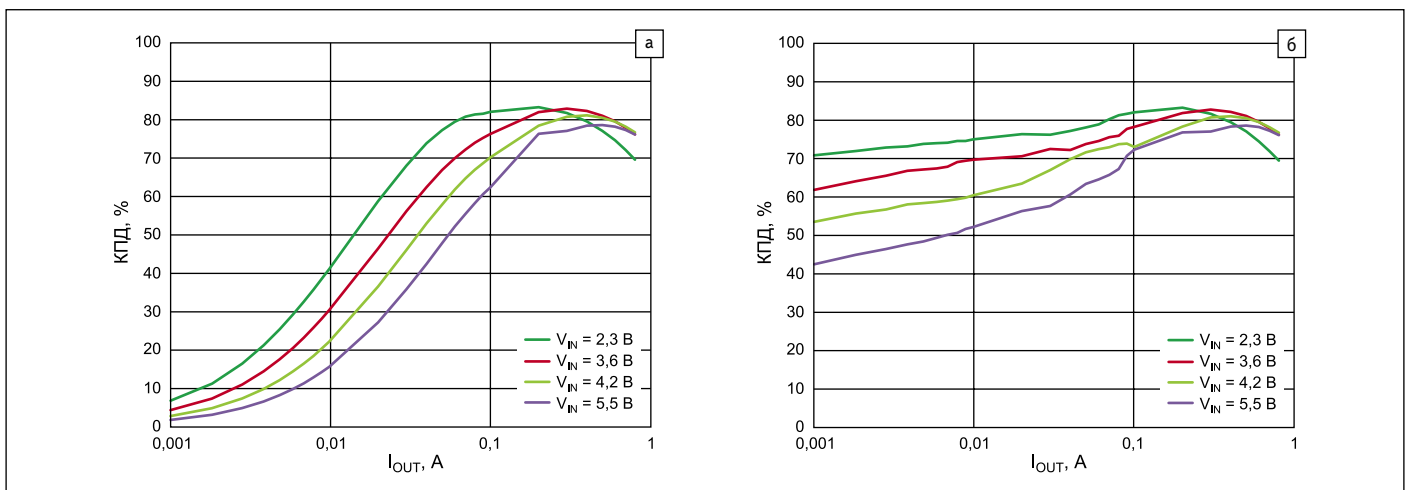


Рис. 4. КПД ADP2138 в режиме непрерывной ШИМ (а) и режиме PSM (б)

мерно на 1,5%. После чего режим ШИМ отключается, оба мощных ключа размыкаются и схема входит в холостой режим. В этом режиме  $C_{OUT}$  разряжается до тех пор, пока  $V_{OUT}$  не упадет до уровня напряжения стабилизации ШИМ. Затем ток снова подается на катушку индуктивности, и  $V_{OUT}$  снова нарастает до верхнего порогового значения. Этот процесс непрерывно повторяется, пока ток нагрузки ниже порогового значения, при котором активируется режим энергосбережения.

ИМС ADP2138 представляет собой миниатюрный понижающий преобразователь постоянного напряжения на 800 мА с частотой коммутации 3 МГц. Его типичная схема применения представлена на рис. 3.

На рис. 4 показано повышение КПД при переключении между режимами ШИМ и PSM по сравнению с принудительной работой в режиме ШИМ.

Из-за переменной частоты фильтрация помех, возникающих в режиме PSM, может быть затруднительна, поэтому многие понижающие импульсные преобразователи имеют вывод MODE (рис. 3), который позволяет пользователю выбирать между принудительной работой в режиме ШИМ и автоматическим переключением между режимами ШИМ/PSM. Напряжение на выводе MODE может быть жестко привязано к определенному уровню или динамически изменяться при необходимости работы с пониженным энергопотреблением.

### Повышение КПД при помощи понижающих импульсных преобразователей

Повышенный уровень КПД позволяет дольше работать без замены или подзарядки батарей, что важно для портативных устройств. Рассмотрим в качестве примера схему на рис. 5, где для питания нагрузки с потребляемым током 500 мА и напряжением 0,8 В от литий-ионного аккумулятора используется ADP125 — преобразователь с малым падением напряжения.

КПД LDO-стабилизатора равен  $V_{OUT}/V_{IN} \times 100\% = 0,8/4,2 \times 100\%$ , то есть всего 19%. LDO-стабилизаторы не могут запасать неиспользуемую энергию, и поэтому 81% (1,7 Вт) мощности, не поступающей в нагрузку, рассеивается в виде тепла

на преобразователе, что может вызывать быстрое нагревание портативного устройства. В свою очередь, импульсный стабилизатор ADP2138 при входном напряжении 4,2 В и выходном напряжении 0,8 В обеспечивает КПД 82%, то есть он в четыре раза более эффективен и предотвращает нагрев портативного устройства. Столь значительное улучшение КПД системы обуславливает широкое применение импульсных преобразователей в портативных устройствах.

### Ключевые характеристики и определения для понижающих импульсных преобразователей

#### Диапазон входных напряжений

Диапазон входных напряжений понижающего импульсного преобразователя определяет наименьшее полезное входное напряжение питания. В спецификации на устройство может быть указан довольно широкий диапазон входных напряжений, однако обязательным требованием для эффективного функционирования является то, что  $V_{IN}$  должно быть больше  $V_{OUT}$ . Так, например, для получения стабилизированного выходного напряжения 3,3 В требуется входное напряжение более 3,8 В.

#### Ток по цепи заземления (рабочий ток)

$I_Q$  — это постоянный ток смещения, не поступающий в нагрузку. Устройства с меньшим  $I_Q$  дают больший КПД. Параметр  $I_Q$  может указываться в спецификации для различных условий, включая режим простоя (отсутствие коммутации), режим нулевой нагрузки, работу в режиме ЧИМ или ШИМ. Поэтому для определения наиболее подходящего для конкретной задачи понижающего преобразователя следует проанализировать значения КПД при конкретных уровнях напряжения и тока нагрузки.

#### Ток в неактивном режиме (Shutdown current)

Это входной ток, потребляемый при неактивном уровне сигнала на выводе разрешения. Этот ток у малопотребляющих импульсных преобразователей обычно много меньше 1 мкА, что важно для условий длительного нахождения портативного устройства в режиме ожидания.

#### Погрешность выходного напряжения

Понижающие импульсные преобразователи компании Analog Devices обладают малой погрешностью выходного напряжения. Компоненты с фиксированным выходным напряжением подвергаются калибровке в заводских условиях для обеспечения погрешности менее  $\pm 2\%$  при температуре 25 °С. Погрешность выходного напряжения измеряется во всем диапазоне рабочих температур, входных напряжений и токов нагрузки и указывается в спецификации для наихудшего случая в виде  $\pm x\%$ .

#### Стабилизация по входному напряжению

Стабилизация по входному напряжению — это изменение выходного напряжения, вызванное изменением входного напряжения, при номинальной нагрузке.

#### Стабилизация по току нагрузки

Стабилизация по току нагрузки — это изменение выходного напряжения при изменении выходного тока. Большинство понижающих импульсных преобразователей способны поддерживать выходное напряжение практически постоянным при медленных изменениях тока нагрузки.

#### Переходные процессы при изменении нагрузки

Погрешности переходных процессов могут возникать при быстром изменении (повышении) тока нагрузки, которое вызывает переключение между режимами ШИМ и ЧИМ. Погрешности переходных процессов при изменении нагрузки не всегда указываются в техническом описании количественно, однако в большинстве описаний даются графики переходных характеристик при различных рабочих условиях.

#### Ограничение тока

Импульсные преобразователи, такие как ADP2138, имеют схему защиты, ограничивающую количество положительного тока, который протекает через ключ на р-МОП транзисторе и синхронный выпрямитель. Ограничение положительного тока определяет количество тока, протекающего с входа на выход. Ограничение отрицательного тока предотвращает обращение направления тока через катушку индуктивности и протекание тока от нагрузки.

#### Мягкий запуск

Для ограничения начального броска тока важно, чтобы импульсный преобразователь имел внутреннюю функцию мягкого запуска, которая обеспечивала бы управляемое линейное изменение выходного напряжения при запуске устройства. Благодаря этому предотвращается падение входного напряжения от батареи или высокоимпедансного источника питания при их подключении к входу преоб-

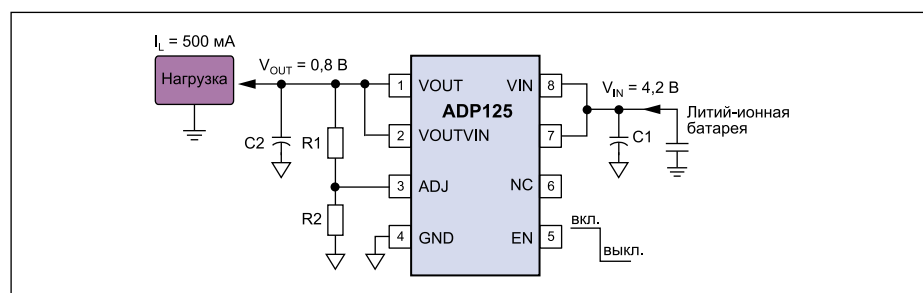


Рис. 5. Питание нагрузки с током 500 мА при помощи стабилизатора с малым падением напряжения ADP125

разователя. После активации устройства вступления в работу схема запускает включение питания.

#### **Время запуска**

Время запуска — это время от переднего фронта сигнала разрешения до момента, когда  $V_{OUT}$  достигает 90% от номинального значения. Обычно этот параметр измеряется при приложенном напряжении  $V_{IN}$  и переключении сигнала на выводе разрешения из неактивного состояния в активное. В случае когда сигнал разрешения подключен к  $V_{IN}$ , время запуска может значительно возрасти из-за времени, необходимого на стабилизацию контура управления. Время запуска понижающего импульсного преобразователя важно для портативных систем, где необходимо часто включать и отключать питание для уменьшения энергопотребления.

#### **Отключение при перегреве**

Если температура возрастает выше заданного предельного значения, схема отключения при перегреве (Thermal Shutdown, TSD) отключает преобразователь. Повышение температуры перехода может стать следствием работы при повышенном токе, недостаточного охлаждения платы и высокой температуры окружающей среды. Схема защиты имеет гистерезис, который предотвращает возврат к нормальному режиму работы до тех пор, пока температура внутри кристалла не упадет ниже предустановленного предельного значения.

#### **Работа со 100%-ным коэффициентом заполнения последовательности импульсов**

При уменьшении  $V_{IN}$  или увеличении  $I_{LOAD}$  понижающий импульсный преобразователь

достигает предельного значения напряжения, при котором ключ на  $p$ -МОП транзисторе замкнут 100% времени и  $V_{OUT}$  становится ниже желаемого выходного напряжения. При этом предельном значении ADP2138 плавно переходит в режим, в котором ключ на  $p$ -МОП транзисторе остается активным все время. Когда условия работы меняются, устройство возвращается в режим преобразования с ШИМ без появления выбросов в  $V_{OUT}$ .

#### **Ключ разряда**

В некоторых системах при очень маленькой нагрузке выходное напряжение понижающего импульсного стабилизатора может оставаться высоким в течение некоторого времени после входа системы в режим ожидания. Если система начнет процедуру включения питания до того, как выходное напряжение полностью разрядится, возможен вход в состояние фиксации или повреждение устройства. В ADP2139 имеется встроенный коммутируемый резистор (типичный номинал — 100 Ом), который используется для разряда выходного напряжения при падении напряжения на выводе разрешения или входе устройства, переводя его в режим блокировки или отключения при перегреве.

#### **Блокировка при пониженном напряжении**

Блокировка при пониженном напряжении (undervoltage lockout, UVLO) гарантирует, что напряжение прикладывается к нагрузке только тогда, когда входное напряжение системы выше определенного порога. Эта функция важна, поскольку она позволяет запускать устройство при условии, что входное напряжение равно значе-

нию, необходимому для стабильной работы, или выше него.

#### **Заключение**

Компания Analog Devices предлагает семейство понижающих импульсных преобразователей с высокой степенью интеграции, которые надежны, просты в применении и недороги, а также требуют минимального количества внешних компонентов для достижения высокого КПД. Для расчета параметров проекта разработчики могут воспользоваться данными, которые приведены в разделе технического описания, посвященном применению компонента, или инструментом проектирования ADIsimPower [4]. Руководства по выбору, технические описания и документы по применению для понижающих импульсных преобразователей компании Analog Devices можно найти по адресу [7].

#### **Литература**

1. [www.analog.com/en/power-management/linear-regulators/products/index.html](http://www.analog.com/en/power-management/linear-regulators/products/index.html)
2. [www.analog.com/en/power-management/switching-regulators/integrated-fet-switches/products/index.html](http://www.analog.com/en/power-management/switching-regulators/integrated-fet-switches/products/index.html)
3. [www.analog.com/en/power-management/switching-controller/external-switches/products/index.html](http://www.analog.com/en/power-management/switching-controller/external-switches/products/index.html)
4. <http://designtools.analog.com/dtPowerWeb/dtPowerMain.aspx>
5. Lenk J. D. Simplified Design of Switching Power Supplies. Elsevier, 1996.
6. Marasco K. How to Apply Low-Dropout Regulators Successfully. Analog Dialogue. Vol. 43, N 3. 2009.
7. [www.analog.com/en/power-management/products/index.html](http://www.analog.com/en/power-management/products/index.html)