

## Теория работы и расчёт неизолированного понижающего преобразователя. Часть 1. Введение. Теоретические основы buck- конвертера

18.04.2012 Импульсные преобразователи, Питание, Теория Комментарии: 0 rfh-admin Метки: buck, step-down, импульсный преобразователь, понижающий преобразователь, преобразователь напряжения

Часть 1. Введение. Теоретические основы buck-конвертера

Часть 2. Анализ различных режимов работы и расчёт элементов buck-конвертера

Часть 3. Переходим от идеальных элементов к реальным.

Итак, buck-конвертер (англ. buck-converter, также известен в англоязычной литературе как chopper, хотя тут полный бардак, поскольку так же, чоппером, иногда называют только силовую часть этого чуда или даже только силовой транзистор) относится к импульсным понижающим (step-down) преобразователям и строится по следующей типовой схеме:



Как можно видеть на рисунке, — конвертер состоит из дросселя, диода, ключа, входного и выходного конденсаторов и схемы управления.

Сначала давайте обсудим в чём тут идея.

Как все понимают, — если источник напряжения постоянно подключен к нагрузке, то энергия от источника питания постоянно перекачивается в нагрузку. Идея, нашего преобразователя заключается в том, чтобы энергия от источника питания к преобразователю передавалась не постоянно, а порциями (импульсами), по одной порции за период. Преобразователь эту полученную порцию энергии размывает на весь период, в результате чего его выходное напряжение получается меньше, чем напряжение источника питания. Более того, регулируя размер передаваемой за период порции (то есть ширину импульса и паузы), можно регулировать величину выходного напряжения. Вот и вся идея.

Исходя из вышеописанной идеи думаю становится понятным и назначение различных элементов преобразователя. Ключ предназначен для подключения и отключения источника питания. В качестве ключа обычно используется полевой или биполярный транзистор. Схема управления решает в какие моменты времени производить переключения ключа, то есть фактически решает — какую порцию энергии нужно от источника питания забрать. Чаще всего схема управления принимает «решение» анализируя напряжение на выходном конденсаторе (это называется управление по напряжению).

Такое управление, когда в зависимости от чего-то регулируется ширина импульса и паузы, называется ШИМ (широотно-импульсной модуляцией) и, соответственно, так же, «шиммами» или «шимками», называются микросхемы, которые это управление осуществляют. Будем считать, что у нас микросхема работает с фиксированной частотой и управление происходит как раз по напряжению.

Далее, зачем нужны катушка индуктивности и выходной конденсатор? Очень просто — они как раз и "размывают" энергию, полученную от источника питания, на весь период. Когда преобразователь подключен к источнику питания — он запасает получаемую энергию в магнитном поле катушки и электрическом поле выходного конденсатора, а когда отключен — отдаёт эту запасённую энергию в нагрузку.

Так, так, так. Раз преобразователь запасает энергию в конденсаторе, а потом отдаёт — значит напряжение на конденсаторе всё таки меняется? Да, меняется, это называется пульсации и никуда от них в импульснике не денешься, но давайте вспомним, что напряжение на конденсаторе связано с запасённой конденсатором энергией соотношением:  $E = CU^2/2$  или по другому:  $U = \sqrt{2E/C}$ . Отсюда понятно, что если у нас достаточно большая ёмкость и достаточно маленькое изменение энергии за период, то изменение напряжения на конденсаторе тоже будет очень маленьким.

На этом с вводной философской частью закончим и перейдём к точному математическому анализу.

- Регистрация
- Войти
- RSS записей
- RSS комментариев

### РУБРИКИ

- Контроллеры
  - ARM
  - PIC
  - AVR
- Программаторы / средства разработки
- Питание
  - Блоки питания
  - Импульсные преобразователи
  - Линейные стабилизаторы
- Интерфейсы
- Домашняя автоматизация
- Светотехника
- Авто/мото/вело
- Радио
- Технологии
- Маркировка
- Полезные программы для ПК

### ОБЛАКО ТЕГОВ

1-Wire ARM avr boost buck C++ Cortex-M3 dc/dc EEPROM I2C Keil uVision MC34063 pic RC-5 RS-232 serial spi step-down step-up stm32 usb жк ик-приёмник ИК-пульт ОУ ШИМ ассемблер импульсный преобразователь интерфейс контроллер манчестерский код мотор операционник операционный усилитель повышающий преобразователь понижающий преобразователь преобразователь интерфейсов преобразователь напряжения программатор программирование протокол светодиод светодиодный драйвер фильтр



DIY Module Boards  
Arduino Compatible

Wholesale & Retail

На рисунках ниже показано как течёт ток в зависимости от состояния ключа (толстыми линиями обозначены пути протекания тока). Схема управления не показана, она обычно потребляет мизерный ток и мы её пока рассматривать не будем, будем рассматривать только силовую часть.



Пусть мы имеем установившийся режим работы. Нарисуем для этого режима графики напряжения в точке А (после ключа, на катоде диода) и токов через ключ, диод и катушку. Напряжение источника питания обозначим  $V_{in}$ , а выходное напряжение преобразователя –  $V_{out}$ . Будем считать, что пульсации выходного напряжения незначительны и выходное напряжение можно считать постоянным.

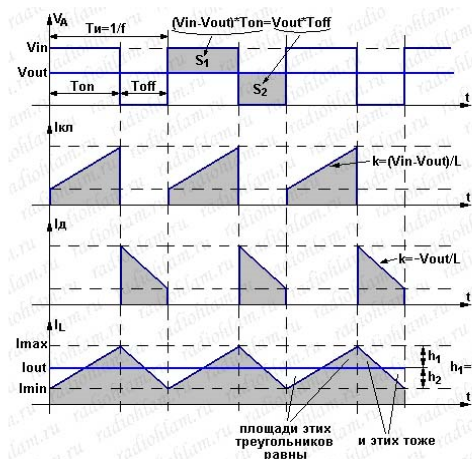
Когда ключ замкнут (левый рисунок) – напряжение на катоде диода равно напряжению питания, соответственно, — падение на катушке постоянно и равно  $V_{in}-V_{out}$ . Диод в это время закрыт, поскольку напряжение на катоде больше, чем на аноде. Ток и напряжение на катушке связаны соотношением  $V = -L di/dt$ , проинтегрировав это выражение найдём как изменяется ток через катушку:  $I = (V_{in}-V_{out}) * t/L$  – это уравнение прямой линии, угол наклона которой зависит от разницы входного и выходного напряжений ( $V_{in}-V_{out}$ ) и индуктивности. Чем больше индуктивность – тем меньше угол наклона, чем меньше индуктивность – тем больше угол наклона. Ток через ключ равен току через катушку (ну потому что тут только один путь, по которому ток течёт в катушку – от источника питания через ключ, диод у нас как вы помните закрыт).

Когда ключ разомкнут (правый рисунок) – напряжение на катушке опять же постоянно и равно  $-V_{out}$ . Как известно – ток через катушку не может измениться скачком, поэтому в момент закрытия ключа скачком меняется напряжение на катоде диода, что приводит к его открытию и к тому, что напряжение на катоде диода становится равно нулю (пока будем считать, что диод идеальный и падение на нём равно нулю). Соответственно напряжение на катушке равно  $0-V_{out}=-V_{out}$ . То есть, зависимость тока от времени в этом случае будет определяться следующим уравнением:  $I = -V_{out} * t/L$ . В данном случае ток через ключ равен нулю, а ток через диод равен току через катушку.

Итак, для напряжения в т.А и токов, имеем:

для замкнутого ключа:  $V = V_{in}$ ,  $I = (V_{in}-V_{out}) * t/L$ , ток течёт через катушку и ключ  
для разомкнутого ключа:  $V = 0$ ,  $I = -V_{out} * t/L$ , ток течёт через катушку и диод

Графики:



Тп – период импульсов  
Топ – время, в течении которого ключ замкнут (ширина импульсов)  
Тoff – время, в течении которого ключ разомкнут (ширина пауз)  
Iкл – ток через ключ  
Id – ток через диод  
IL – ток через катушку

Выходной ток равен среднему току через катушку, а выходное напряжение – среднему напряжению в т.А.

Посмотрим, что нам это даёт:

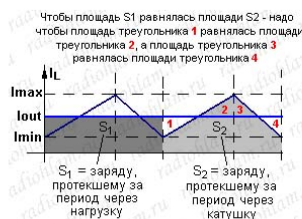
1) Среднее за период напряжение в т.А равно выходному напряжению  $V_{out}$ , поскольку у катушки нет активного сопротивления (мы же пока идеальные элементы рассматриваем) и среднее падение на ней за период равно нулю, то есть:  
 $V_{in} * T_{on} + 0 * T_{off} = V_{out} * (T_{on} + T_{off})$ , отсюда:

$$V_{in}/V_{out} = (T_{on} + T_{off})/T_{on} \quad (1)$$

2) Поскольку у нас установившийся режим, то за время замкнутого состояния ключа ток в катушке вырастает настолько же, насколько он спадает за время разомкнутого состояния (иначе бы у нас менялся выходной ток). То есть  $(V_{in}-V_{out}) * T_{on}/L = V_{out} * T_{off}/L$ , отсюда:

$$T_{on}/T_{off} = V_{out}/(V_{in}-V_{out}) \quad (2)$$

Кроме того, очевидно, что график, соответствующий среднему току, должен проходить по серединам рёбер нашей пилы, потому что только в этом случае площади отмеченных на графике треугольников будут равны. Почему эти площади должны быть равны? Потому что площадь под графиком тока от времени — это заряд. А заряд, протекший за период через нагрузку, должен быть равен заряду, протекшему за период через катушку индуктивности (смотрим на рисунок справа). Соответственно, высота  $h_1$  равна высоте  $h_2$  (раз уж у нас равны по площади прямоугольных треугольников, с одинаковыми углами, равны гипотенузы). Таким образом, для токов можно записать:



$$I_{out} = (I_{max} + I_{min})/2.$$

Теперь давайте подумаем, что происходит, когда график тока через катушку расположен выше графика выходного тока?



В это время через катушку проходит больше заряда, чем уходит в нагрузку. Соответственно, когда график тока через катушку расположен ниже графика выходного тока — через катушку проходит меньше заряда, чем уходит в нагрузку. Куда же девается и откуда берётся «лишний» заряд? Всё очень просто — он накапливается выходным конденсатором, а потом расходуется.

Вот здесь мы, кстати, натываемся на первую неточность большинства рисунков, объясняющих работу таких конвертеров. Помните рисунки, на которых было показано как течёт ток в зависимости от состояния ключа? Я их специально перерисовал из доступных источников как есть. Теперь, глядя на графики тока, мы видим, что в обоих состояниях ключа есть интервалы, когда выходной конденсатор заряжается и в обоих состояниях есть интервалы, когда выходной конденсатор разряжается (смотрим на рисунок слева).

Несмотря на то, что это кажется нелогичным, на самом деле всё очень даже логично. Так происходит из-за того, что ток через катушку индуктивности не может измениться мгновенно, не может мгновенно вырасти при подключении источника питания и не может мгновенно упасть при его отключении. Так что, возвращаясь к рисункам где показано как течёт ток в зависимости от состояния ключа, правильно было бы ток в конденсатор и из конденсатора вообще не рисовать, и тем более не говорить, что когда ключ замкнут — конденсатор заряжается, а когда разомкнут — разряжается. Правильный комментарий должен звучать как-то так: «Когда ключ замкнут — в преобразователь и нагрузку передаётся энергия от источника питания. Она сразу начинает запасаться катушкой (но конденсатор всё ещё подпитывает нагрузку), а позднее, когда ток через катушку превысит выходной ток, — передаваемая энергия начинает запасаться и конденсатором. Когда ключ разомкнут — энергия от источника питания в нагрузку и преобразователь не передаётся. При этом сначала начинает расходоваться энергия, запасённая в катушке (и на нагрузку и на продолжение заряда конденсатора), а потом, когда ток через катушку становится меньше выходного тока, — конденсатор тоже начинает отдавать запасённую энергию.»

Ладно, это всё чудесно, но какую практическую ценность несёт для нас понимание того, как и когда заряжается и разряжается этот самый выходной конденсатор? Да самую прямую. Мы теперь можем точно посчитать на какую величину изменяется его заряд, а значит и на какую величину будет изменяться напряжение на нём при той или иной его ёмкости. Или, если мы зададим некий допустимый уровень пульсаций, то можно посчитать — какой должна быть ёмкость выходного конденсатора, чтобы пульсации напряжения на выходе преобразователя не превышали заданный уровень.

Итак, суммарный «лишний» заряд, который должен накопить конденсатор пока ток через катушку больше выходного тока, равен площади треугольника, расположенного выше линии  $I(t) = I_{out}$  (треугольник, образованный маленькими треугольничками «2» и «3» на одном из вышеприведённых рисунков). Эта площадь равна:

$$1/2 * (I_{max} - I_{out}) * t_{on}/2 + 1/2 * (I_{max} - I_{out}) * t_{off}/2 = 1/4 * T * (I_{max} - I_{out}), \text{ где } T - \text{период импульсов}$$

Или, учитывая что  $T = 1/f$ , окончательно получаем:

$$(I_{max} - I_{out}) / (4 * f), \text{ где } f - \text{частота импульсов}$$

Тогда пульсации, обозначим их  $V_{p-p}$  ( $V_{p-p} = V_{max} - V_{out}$ ), можно найти по следующей формуле:

$$V_{p-p} = (I_{max} - I_{out}) / (4 * C * f)$$

Или, если мы задаём допустимый уровень пульсаций и хотим посчитать ёмкость конденсатора, то получим:

$$C = (I_{max} - I_{out}) / (4 * V_{p-p} * f)$$

Вот, собственно, и вся базовая теория описывающая наш преобразователь. Но это ещё не самое интересное. Самое-то интересное для нас что? Правильно, самое интересное, это: во-первых, понять что будет происходить если уменьшать/увеличивать различные параметры (выходную ёмкость, индуктивность, частоту...), ну и во-вторых, понять как же всё-таки рассчитывать элементы преобразователя, поскольку, если вы заметили, в вышеприведённых формулах участвуют  $V_{in}$ ,  $I_{out}$  и прочие компоненты, величина которых может меняться, в связи с чем пока не понятно, какие именно значения использовать в расчётах (максимальные, минимальные, средние). Вот об этом мы поговорим во второй части нашей статьи, а построенные ранее графики очень сильно нам в этом помогут. Графический анализ вообще очень удобен своей наглядностью.

*Часть 1. Введение. Теоретические основы buck-конвертера*

*Часть 2. Анализ различных режимов работы и расчёт элементов buck-конвертера*

*Часть 3. Переходим от идеальных элементов к реальным.*

Понравилась статья? Поделись с друзьями!



Метки: buck, step-down, импульсный преобразователь, понижающий преобразователь, преобразователь напряжения

## Добавить комментарий

Для отправки комментария вам необходимо [авторизоваться](#).

