

# НАЧАЛЬНАЯ ШКОЛА ПОСТРОЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (ТРЕТИЙ КЛАСС)

**Александр Гончаров**, к.т.н., главный конструктор ООО «Александр Электрик»,  
координатор Российской ассоциации производителей источников электропитания (РАПИЭП)

*«Первый ВИП – катушка зажигания автомобиля» –  
важный довод считать Вторичный Источник Питания  
«первичным» в электронике.*

## ПЕРЕХОДИМ В ТРЕТИЙ КЛАСС

В «первом и втором» классах (см. «ЭК» №6 и №7 за 2002 год) мы рассматривали некоторые основы построения очень важной для энергетической электроники схемы – одноступенчатого (одиночного) однотактного прямоходового преобразователя (ОПП).

Сразу нужно заметить – маленькие ошибки при рассмотрении очень больших и важных вопросов иногда случаются. Вот и подписи под рисунками 6 и 7 («первый класс») должны быть совсем другими – «Диаграммы токов и напряжений в элементах ОПП с неразрывным током дросселя» и «Диаграммы токов и напряжений в элементах ОПП с разрывным током дросселя» соответственно.

Да и рассуждения замучили – как правильно одиночный или одноступенчатый? Дело в том, что автор подготовил для дальнейшего рассмотрения (опять же, покупайте все номера журнала!) интересные схемы, построенные на комбинации двух преобразователей. И если это будут «двойные» преобразователи – тогда удобен термин «одиночный», но скорее всего автор остановится на термине «сдвоенные» – и конечно правильное – «одноступенчатый». На ту же букву, но веселее. Согласитесь, «одиночный» – это что-то слишком грустное для такого замечательного и важного устройства.

Итак, рассмотрев схему одноступенчатого прямоходового преобразователя (ОПП), и присвоив ему за высокую энергетическую эффективность звание «Мерседес среди DC/DC-преобразователей», попробуем найти что-то противоположное, концептуально другое – этакий «Пежо» (а кому нравится – «Тойота»...) среди источников электропитания. Таким «Пежо» является наиболее распространенный в мировой практи-

ке одинарный однотактный обратнотактовый преобразователь (ООП).

Вспомните, как работает катушка зажигания в автомобиле. Вначале через контакты прерывателя с шунтирующей (помехоподавляющей) емкостью к аккумуляторной батарее подключается первичная обмотка катушки зажигания, а затем, после размыкания контактов, происходит разряд накопленной в катушке и «перепрыгнувшей» во вторичную обмотку энергии на свечу зажигания, в которой происходит дуговой разряд, кстати, стабилизирующий напряжение! Вот, когда в давние времена это придумали, тогда и появились первые ВИПы – однотактные обратнотактовые преобразователи.

Итак – что же это за «Пежо» среди ВИПов?

## ОДИНАРНЫЙ ОДНОТАКТНЫЙ ОБРАТНОХОДОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Схема такого преобразователя приведена на рисунке 1. Синим цветом выделены элементы, действие которых будет пояснено при дальнейшем, более пристальном рассмотрении ООП.

Входное напряжение питания  $U_{вх}$  подается на последовательно соединенные первичную обмотку  $w_1$  трансформатора Т1 и ключ, реализованный на транзисторе VT1. Предположим, что ключ на МОП-транзисторе идеален, он быстро (условно – мгновенно) переключается из включенного состояния в выключенное и наоборот, а падение напряжения на включенном МОП-транзисторе исчезающе мало. Источник  $U_{вх}$  – стабилизированный, и через него без труда замыкаются высокочастотные импульсные токи преобразователя. Конденсатор С2 представляет собой (в некотором приближении) эквивалентную емкость всех емкостей, приведенных к

первичной обмотке  $w_1$  трансформатора Т1:

- собственной емкости обмотки  $w_1$ ;
- приведенной емкости обмотки  $w_2$ ;
- выходной емкости транзистора VT1;
- емкости монтажа;

и т.п., вплоть до емкости, намеренно поставленной разработчиком ВИП. Как для ОПП, так и для ООП емкость С2 существует всегда, и для высокочастотных преобразователей пренебрегать ею нельзя.

Схема управления СУ1 подает на затвор МОП-транзистора VT1 управляющие импульсы (см. рис. 2 а), величина которых достаточна для надежного открывания транзистора VT1. При периоде следования импульсов Т относительная длительность каждого импульса равна @. При открытом транзисторе VT1 первичная обмотка  $w_1$  трансформатора Т1 подключена к источнику входного напряжения  $U_{вх}$ . Идеальная осциллограмма на стоке транзистора приведена на рисунке 2 б. В течение времени @ на обмотке  $w_1$  и конденсаторе С2 существует постоянное напряже-

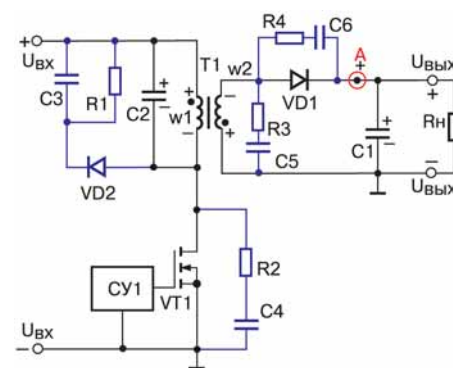


Рис. 1. Схема силовой части одинарного одноступенчатого прямоходового преобразователя

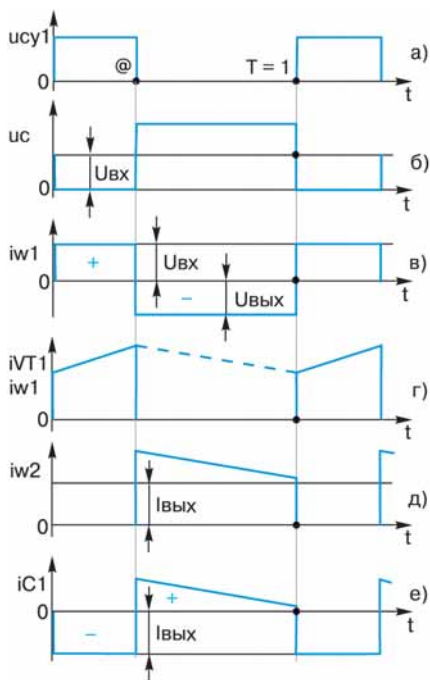


Рис. 2. Диаграммы напряжения и тока в схеме ООП для режима неразрывных токов

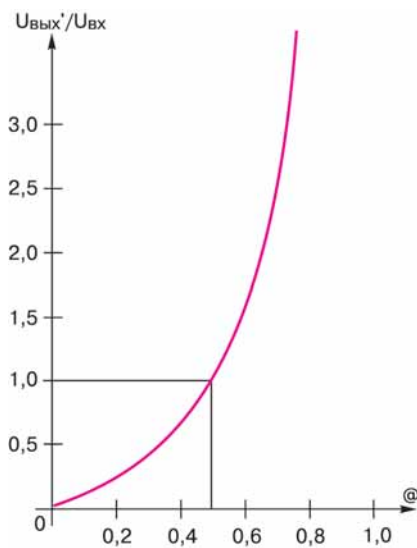


Рис. 3. Регулировочная характеристика ООП

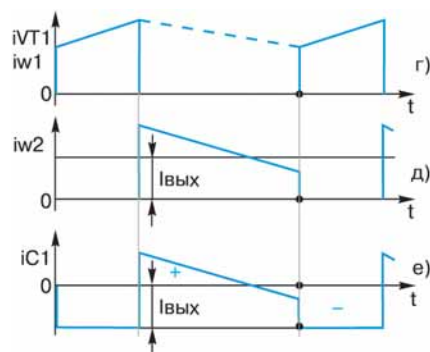


Рис. 4. Диаграммы тока в схеме ООП для режима разрывных токов

ние  $U_{вх}$  (см. рис. 2 в). Исходная полярность напряжения на обмотках трансформатора и на конденсаторе С2 показана на рисунке 1.

На вторичной обмотке  $w_2$  трансформатора Т1 в течение времени @ существует такое же по форме напряжение, имеющее величину в соответствии с коэффициентом трансформации. До времени @ выходной диод VD1 закрыт отрицательным напряжением, поступающим с обмотки  $w_2$ .

В соответствии с формулой для индуктивности, ток через индуктивность обмотки  $w_1$  (через транзистор VT1) за время @ линейно нарастает (см. рис. 2 г). Так как передача энергии в нагрузку ООП не происходит (закрыт выходной диод), то в индуктивности обмотки  $w_1$  накапливается энергия  $W = L_1 \times I^2/2$ .

При выключении транзистора VT1 во время @ выключение и спад тока через транзистор VT1 происходит «мгновенно». Условно мгновенно (правильно – очень быстро) разряжается до нуля конденсатор С2, так как в этот момент времени он отдает большой рабочий ток обмотке  $w_1$  (т.е. кратковременно выполняет роль источника входного напряжения). Но так как ток в индуктивности мгновенно исчезнуть не может, то он почти мгновенно перезаряжает конденсатор С2 в полярности, противоположной показанной на рисунке 1 до напряжения  $U_{вых'}$ . При этом из-за появления на обмотке  $w_2$  напряжения с полярностью, противоположной показанной на рисунке 1, мгновенно открывается диод VD1. В результате обмотка  $w_2$  через диод VD1 присоединяется к конденсатору С1, т.е. к нагрузке.

Здесь важно предположить, что емкость конденсатора С1 достаточно велика, чтобы можно было пренебречь пульсациями напряжения на нем, следовательно, напряжение на нагрузке стабильно и неизменно.

Так как накопленная в  $w_1$  энергия практически никуда не потрачена (конечно мы учитываем, что в конденсаторе С2 теперь имеется накопленная энергия  $W = C_2 \times U_{вых'}^2/2$ ), она с момента времени @ начинает тратиться на заряд конденсатора С1 и на питание нагрузки (см. рис. 2 д) в виде спадающего тока обмотки  $w_2$ .

Нужно заметить, дорогой читатель, что «Пежо», т.е. данный ООП, не лыком шит. В нем даже в этих простейших процессах прячется интрига. Посмотрите внимательно на ри-

сунк 2. Естественно, пока ток через обмотку  $w_2$  будет существовать весь интервал от момента времени @ до 1 (т.е. до Т), обмотка  $w_2$  будет присоединена фактически к постоянному выходному напряжению через открытый диод VD1. Именно это и формирует прямоугольную часть напряжения на обмотке  $w_1$  величиной  $U_{вых'}$ . Но так как вольт-секундная площадь напряжения на индуктивности за период всегда равна нулю (см. рис. 2 в), то зная напряжение входного питания и время открытого состояния ключа VT1, читатель всегда элементарным образом вычислит выходное напряжение ООП. Кстати, совсем без сложных выводов, приведенных в учебниках:  $U_{вых} = U_{вх} \times N \times \alpha / (1 - \alpha)$ , где  $N = w_2/w_1$  – коэффициент трансформации Т1.

Регулировочная характеристика (а данное выражение она и есть) ООП, в отличие от таковой для ОПП, нелинейна. Здесь приятный сюрприз в том, что это просто и легко выводится графически.

А вот для тока через конденсатор С1, учитывая, что ампер-секундная площадь за период для конденсатора всегда равна нулю (см. рис. 2 е), легко увидеть, что если вершина импульса тока будет иметь достаточно крутой скос на интервале от @ до 1 (Т), то в конце этого интервала ток, отдаваемый конденсатором С1 (отрицательные значения тока), обязательно будет не прямоугольной формы, как это часто рисуют в учебниках, а с характерным пологим спадающим участком. Эти два интересных момента-сюрприза автор показал на рисунках 3 и 4.

Регулировочная характеристика ООП (см. рис. 3) кроме того, что она нелинейна, еще говорит и о том, что в ООП такие же изменения @, как и в ОПП, приводят к большим изменениям выходного напряжения. Т.е. ООП регулируется в более широких пределах. На практике используется зона @ от 0 до 0,7 (максимум). А вот часть диаграмм рисунка 2, приведенная на рисунке 4, наглядно выявляет упомянутый спадающий участок тока через конденсатор С1.

Режим, когда ток обмотки  $w_2$  за время от @ до 1 (Т) не успевает спадать до нуля, является режимом неразрывного тока. Естественно, может существовать и режим разрывного тока (см. рис. 5). Здесь есть интересная особенность – ток вторичной обмотки после некоторого времени от момента @ становится равным

нулю — то есть вся накопленная в трансформаторе Т1 энергия за время открытого состояния силового транзистора VT1 переходит в выходную емкость С1 и нагрузку. В результате напряжение на обмотке w2 в этот момент могло бы стать нулевым (если в индуктивности нет изменения тока — нет и напряжения), однако мы забыли о емкости С2.

Накопленная в ней энергия  $W = C2 \times U_{\text{вых}}^2 / 2$  с этого момента времени вызывает колебательный процесс (см. рис. 5 б и в), причем свободный, так как w1 свободна — силовой транзистор VT1 выключен, и w2 свободна — диод VD1 закрыт. На самом деле в нашей схеме все-таки есть небольшие потери в С2, которые делают упомянутый колебательный процесс затухающим.

Что характерно для режима разрывных токов? Легко заметить, что принципиально изменилась вольт-секундная площадь на интервале от @ до 1 (Т). Так как рабочая часть импульса на этом интервале уменьшилась, трансформатор Т1 компенсирует вольт-секундную площадь увеличением напряжения  $U_{\text{вых}}$ , если вольт-секундную площадь импульса за время от 0 до @ мы оставим прежнюю, как в режиме с неразрывными токами. То есть ООП в режиме разрывных токов начинает завышать выходное напряжение!

Видите, как много тонкостей возникает в работе даже идеальной схемы ООП, в этом, казалось бы, простеньком «Пежо»! Здесь вам и необходимость допущения потерь в изначально безпотерной схеме и достаточно интересный дополнительный режим при неразрывных токах на интервале от @ до 1 (Т).

Кто же дирижирует всеми этими несуразностями, есть ли здесь своеобразный «властелин колец», такой как io в ОПП? Да — это индуктивность обмоток трансформатора (достаточно оперировать значением одной индуктивности, например, L1 первичной обмотки w1, так как другие жестко с ней связаны через коэффициенты трансформации. Например, для обмотки w2:  $L2 = L1 \times N^2$ ).

Действительно, как мы показали, многие процессы в ООП меняют свое качество в зависимости от скорости нарастания и спада рабочих токов в обмотках Т1. Попробуем вывести соотношение для граничного режима по току нагрузки (граничный он потому, что разделяет режим неразрывных токов и режим разрыв-

ных токов в обмотках трансформатора Т1).

Перед доказательством отметим две особенности. Первая заключается в том, что ток нагрузки есть среднее значение тока обмотки w2. Действительно, ток нагрузки — это постоянный ток. Через конденсатор постоянный ток протекать не может, а единственным источником энергии именно для постоянного тока на выходе ООП является обмотка w2. Так что достаточно мысленно взять площадь диаграммы тока w2 (см. рис. 2 д) и разделить ее на период Т, чтобы получить ток нагрузки  $I_{\text{вых}}$ .

Вторая важная особенность ООП заключается в том, что скорость изменения (спадания) тока обмотки w2 при постоянном выходном напряжении и постоянной индуктивности L2 неизменна:  $di/dt = -U_{\text{вых}}/L2$ . Пытливый читатель легко это выведет из формулы для индуктивности. Поэтому при заданной L1, а следовательно и  $L2 = L1 \times N^2$ , можно представлять, как мы уменьшаем ток нагрузки  $I_{\text{вых}}$ , а диаграмма тока обмотки w2 при этом, не меняя наклона склона вершины импульса тока, уменьшается по высоте, пока не коснется крайней правой точкой склона вершины импульса на оси ординат.

В этом случае и наступит граничный режим, разделяющий режим неразрывных и разрывных токов. Тогда

$$\Delta i / (T (1 - @_{\text{мин}})) = U_{\text{вых}} / L2$$

или

$$L1 = U_{\text{вых}} \times T \times (1 - @_{\text{мин}}) / N^2 \times \Delta i;$$

но в то же время определение выходного тока как среднее значение от тока w2 дает выражение:

$$I_{\text{вых}} = \Delta i \times (1 - @_{\text{мин}}) / 2$$

или

$$\Delta i = 2 I_{\text{вых}} / (1 - @_{\text{мин}}).$$

В результате получаем:

$$L1 = U_{\text{вых}} \times T \times (1 - @_{\text{мин}})^2 / (2 I_{\text{вых}} \times N^2).$$

Из этого выражения видно, что чем меньше ток нагрузки, тем большую индуктивность трансформатора необходимо обеспечить. Вспомните, что похожий вывод мы сделали для индуктивности выходного дросселя ОПП.

Также как и для ОПП, для ООП при  $I_{\text{вых}} = 0$  значение  $L1 = \infty$ , т.е. такой трансформатор придется мотать «очень и очень долго», и единственный выход для сохранения режима

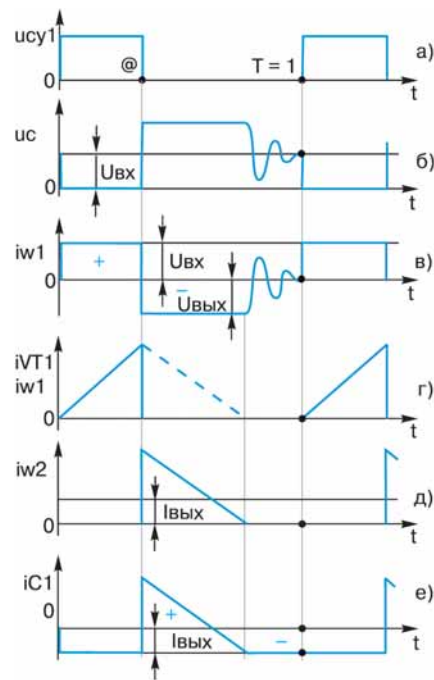


Рис. 5. Диаграммы токов и напряжений в схеме ООП для режима разрывных токов

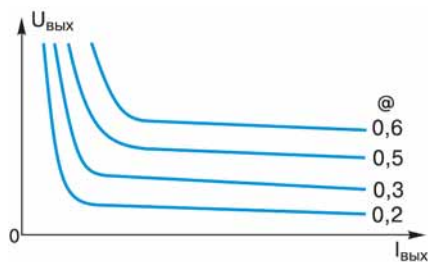


Рис. 6. Регулировочные характеристики ООП

неразрывных токов при малых токах нагрузки — дополнительная «подгрузка» ООП.

Характеристика выходного напряжения, в зависимости от наличия режимов неразрывных и разрывных токов, которую автор приводил для описания ОПП («первый класс») качественно актуальна и для ООП (см. рис. 6). Такая характеристика показывает эффект «задиранья» выходного напряжения при уменьшении тока нагрузки из-за режима разрывного тока L1 трансформатора Т1. Но, как уже отмечалось выше, режим разрывных токов в ООП может быть весьма полезен при построении высоковольтных преобразователей.

Наиболее сложное в ООП — реализация трансформатора. В сущности это многообмоточный дроссель.

Действительно, на интервале от 0 до @ ток в обмотке w1 протекает от

ее начала к концу, формируя положительную напряженность магнитного поля магнитопровода трансформатора Т1, а на интервале от @ до 1 (Т) ток обмотки w2 также протекает от ее начала к концу и знак напряженности магнитного поля в магнитопроводе не меняется.

Таким образом, магнитопровод трансформатора Т1 (теперь уже — дросселя) находится под действием однонаправленного магнитного поля и постоянно намагничен. Известно, что в таком случае применяют специальные сердечники с немагнитным зазором, например ферритовые сердечники из двух половинок с за-

зором в виде немагнитной прокладки. Обычно именно этим зазором (после выбора сердечника) и формируется необходимая индуктивность обмоток Т1.

Также широко используются магнитопроводы из прессованных материалов, например из МО-пермаллоя. Такой сердечник — это крушинки пермаллоя, спрессованные в магнитопровод при помощи немагнитного связующего вещества. В результате наличия множества микрозазоров образуется равномерно распределенный зазор.

В данной части нашего урока полезно обратить внимание читателя на положительную роль емкости С2, ко-

торую она проявляет в режиме разрывных токов. При разряде емкости С2 — формировании свободного колебательного процесса — ток разряда емкости С2 протекает в направлении от конца обмотки w1 к ее началу. Это приводит к эффекту определенного размагничивания магнитопровода трансформатора Т1.

Здесь автор предполагает, что к этому моменту читатели безусловно устали, хотя и являются уже третьеклассниками. Поэтому другие интересные свойства ООП — в следующем рассказе «классе».

Далее — рекламная пауза, посвященная любимой фирме.

## I События рынка

### »» FeRAM становится достойным конкурентом флэш-памяти

Компании Toshiba и Infineon "роют могилу" технологии flash-памяти, чипы которой используются в современных мобильных телефонах, карманных компьютерах, цифровых фотоаппаратах и пр. "Могильщиком" обещает стать память типа FeRAM. FeRAM, так же как и flash является энергонезависимой памятью, но отличается от последней более высокой плотностью и скоростью записи информации. При одинаковом размере чипов flash- и FeRAM-памяти, на последний можно записать вдвое больше данных. Время доступа к данным, записанным на карте flash-памяти, составляет порядка 200 мс, а у разработанного Toshiba и

Infineon чипа FeRAM-памяти время доступа составляет 50 нс. Кроме того, энергопотребление FeRAM-памяти ниже, чем у flash.

FeRAM-память работает, используя свойства ферроэлектрических кристаллов. Если к ферроэлектрическому кристаллу приложить внешнее электрическое поле, то центральный атом в кристалле сдвинется в направлении этого поля. При отключении электрического поля смещенный атом останется на месте. До сих пор технология FeRAM не могла тягаться с картами flash-памяти по причине того, что чипы FeRAM обладали довольно малой емкостью. Однако Toshiba и Infineon удалось создать чип емкостью 32 Мбит, который уже вполне пригоден для установки в мобильные телефоны и карманные компьютеры.

Toshiba Corp. <http://www.toshiba.co.jp>  
Источник: Россия-Он-Лайн



**АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК**



## DC/DC МОДУЛИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### СЕРИЯ МИРАЖ-М



Основа для построения высокоэффективной системы распределенного электропитания. Для потребителей, имеющих в аппаратуре входной выпрямитель сети и входной фильтр - сетевой конденсатор.

Самый экономичный путь реализации мощности до 120 Вт в малых габаритах

Входное напряжение DC 75...150, 175...350 В  
Габариты от 58x40x10мм до 110x84x13 мм  
Рабочая температура корпуса -60...+85С  
Энергетическая плотность до 1000 Вт/дм<sup>3</sup>

Группа компаний Александр Электрик  
[www.aeps.ru](http://www.aeps.ru)  
(095) 181-0522 [alecsan@online.ru](mailto:alecsan@online.ru)  
[www.aeps.ru](http://www.aeps.ru)  
(0732) 76-3390 [alexdon@vmail.ru](mailto:alexdon@vmail.ru)

Официальные дистрибьюторы  
Компэл [compel@compel.ru](mailto:compel@compel.ru)  
ПетройнТрейд  
(812) 3246611 [semicond@pit.spb.ru](mailto:semicond@pit.spb.ru)