

## Сравнительная оценка двух типов преобразователей постоянного напряжения

Мелешкин В.Н.

*Рассмотрены одноконтные обратноходовые преобразователи постоянного напряжения – повышающий и инвертирующий. Показаны преимущества инвертирующих преобразователей перед повышающими в условиях равных входных и выходных напряжений и мощностей.*

Одноконтные обратноходовые преобразователи – повышающие, понижающие и инвертирующие – широко используются в современных устройствах силовой электроники как своеобразные трансформаторы, точнее, автотрансформаторы постоянного напряжения. Базовые структуры этих преобразователей уже давно и достаточно хорошо изучены и описаны [1 - 4], однако преобразователи, составленные из таких базовых блоков, обнаруживают порой неожиданные свойства и особенности, которые могут оказаться полезными для современных разработчиков. Приведенные ниже соображения, возможно, послужат подтверждением этому.

Итак, напомним вкратце принцип действия и основные свойства двух таких базовых структур – повышающего (рис. 1) и инвертирующего (рис. 2). Как видно, у них имеется много общего – ключевой режим работы (как правило, с использованием широтно-импульсной модуляции), состав элементов (транзистор  $S$  и диод  $D$ , дроссель  $L$  и конденсатор  $C$ ) и даже схемотехника (дроссель и транзистор подсоединены к источнику энергии с напряжением  $V$ , конденсатор и диод – к потребителю энергии с током  $J$ , причём, источник и потребитель имеют общий вывод).

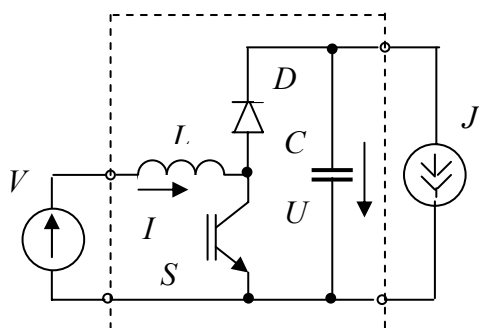


Рис. 1 – Схема повышающего преобразователя

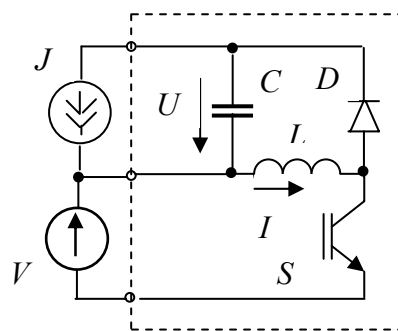


Рис. 2 – Схема инвертирующего преобразователя

Единственное и определяющее различие между ними состоит в том, что выходное напряжение  $U$  в повышающем преобразователе всегда больше входного  $V$ , причём, полярность этих напряжений относительно общего вывода одинакова, а в инвертирующем преобразователе выходное напряжение может быть как больше, так и меньше входного, но полярности их относительно общего вывода всегда противоположны (инверсия напряжения).

Для упрощения последующего анализа сделаем общепринятые допущения: во-первых, предположим отсутствие тепловых потерь во всех элементах преобразователей, а также в источниках и потребителях энергии, во-вторых, будем считать пренебрежимо малыми пульсации тока в дросселях и напряжения на конденсаторах, обусловленные ключевым режимом работы преобразователей, и наконец, в-третьих, примем неизменным период  $T$  коммутации силовых ключей, а требуемую стабилизацию напряжения на выходе

преобразователей полагаем осуществлять изменением относительной (относительно периода  $T$ ) продолжительности  $\gamma$  проводящего состояния транзисторов.

Переходя к анализу базовых структур преобразователей, отметим, в частности, что в инвертирующем преобразователе на интервале времени  $0 \leq t \leq \gamma T$  происходит передача энергии из источника в дроссель, так что

$$V = L \frac{\Delta I}{\gamma T},$$

где  $L$  – индуктивность дросселя и  $\Delta I$  – размах пульсаций тока в нём, а на интервале времени  $\gamma T \leq t \leq T$  эта энергия из дросселя поступает в конденсатор и потребитель, следовательно

$$U = L \frac{\Delta I}{(1 - \gamma)T}.$$

Считая величины  $L$ ,  $T$  и  $\Delta I$  неизменными в установившемся режиме, из приведенных соотношений находим

$$\gamma V = (1 - \gamma)U. \quad (1)$$

Аналогичное соотношение можно получить и для повышающего преобразователя, если учесть, что в нём передача энергии на втором интервале происходит с участием источника, т.е.

$$U - V = L \frac{\Delta I}{(1 - \gamma)T}.$$

В результате находим

$$V = (1 - \gamma)U. \quad (2)$$

Полученные два соотношения (1) и (2), а также ещё несколько полезных (без доказательства) соотношений приведены в табл. 1, где, в частности, входная и выходная мощности преобразователей равны (допущение об отсутствии потерь) и потому обозначены одной и той же буквой  $P$ . Подстрочные индексы 1 и 2 соответствуют номерам рисунков, на которых изображены схемы повышающего и инвертирующего преобразователей.

Табл. 1 – Основные расчётные соотношения для базовых структур преобразователей

Наименование параметров (входных и выходных)	Типы преобразователей	
	повышающий (рис. 1)	инвертирующий (рис. 2)
напряжения	$V_1 = (1 - \gamma_1)U_1$	$\gamma_2 V_2 = (1 - \gamma_2)U_2$
токи	$J_1 = (1 - \gamma_1)I_1$ , где $I_1 = I_{L1}$	$\gamma_2 J_2 = (1 - \gamma_2)I_2$ , где $I_2 = \gamma_2 I_{L2}$
мощности	$P_1 = V_1 I_1 = U_1 J_1$	$P_2 = \gamma_2 V_2 I_2 = U_2 J_2$

Сравнение базовых структур выполним при одинаковых напряжениях на силовых ключах ( $U_1 = V_2 + U_2$ ) и прочих равных условиях:

$$V_1 = V_2 = V, \quad I_{L1} = I_{L2} = I, \quad J_1 = J_2 = J, \quad \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma. \quad (3)$$

В итоге получаем, что мощности инвертирующего и повышающего преобразователей связаны соотношением  $P_2 = \gamma P_1$ , т.е. по реализуемой мощности инвертирующий преобразователь уступает повышающему. Этот результат вполне согласуется с рассмотренными выше особенностями базовых структур: в повышающем преобразователе энергия поступает от источника непрерывно, а в инвертирующем преобразователе – только на первом интервале периода коммутации.

Теперь перейдём к рассмотрению составного преобразователя, схема которого приведена на рис. 3. Нетрудно показать, что этот преобразователь состоит из двух инвер-

тирующих блоков, входы которых подсоединены к источнику энергии параллельно, а их выходы – последовательно с источником.

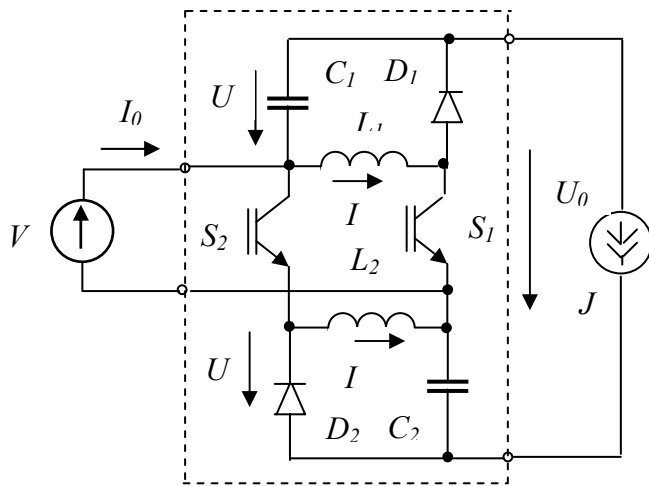


Рис. 3 – Схема составного инвертирующего преобразователя

Для этого достаточно заменить реальный потребитель  $J$  тремя эквивалентными (с таким же током  $J$  и соединёнными последовательно), а образовавшиеся при этом дополнительные выводы потребителей совместить с выводами источника так, что крайние потребители оказываются подсоединёнными параллельно конденсаторам, а средний – параллельно источнику. При этом один из блоков (элементы  $S_1, D_1, L_1$  и  $C_1$ ) в точности повторяет базовую структуру инвертирующего блока, изображённую на рис. 2, а структура другого (на элементах  $S_2, D_2, L_2$  и  $C_2$ ) является «зеркальным» отображением структуры первого.

«Зеркальность» структур базовых блоков проявляется и в их функциональном назначении – первый блок повышает положительный потенциал источника, а второй блок понижает его отрицательный потенциал, так что выходные выводы преобразователя потенциально симметричны относительно воображаемого среднего вывода источника. Две другие примечательные особенности рассматриваемого преобразователя состоят в следующем: во-первых, напряжение на каждом из конденсаторов равно полуразности выходного и входного напряжений и, во-вторых, напряжение на каждом из транзисторов (в непроводящем состоянии) равно полусумме выходного и входного напряжений.

Перечисленные особенности – все вместе и каждая в отдельности – уже выгодно отличают рассматриваемый преобразователь от структуры повышающего блока, изображённой на рис. 1. Тем не менее, представляет интерес и количественная оценка сравниваемых схмотехнических решений, при этом логично сравнивать составной инвертирующий преобразователь с составным же повышающим преобразователем, схема которого приведена на рис. 4.

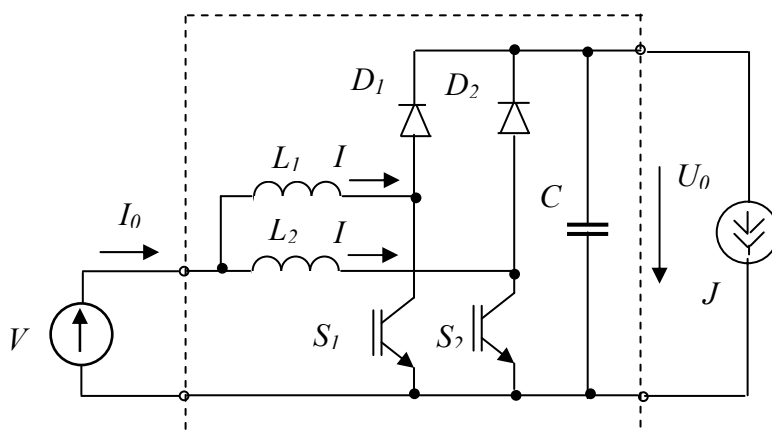


Рис. 4 – Схема составного повышающего преобразователя

Как видно, этот преобразователь тоже содержит два базовых блока, входы и выходы которых соединены параллельно и подключены соответственно к общему источнику  $V$  и потребителю  $J$ .

Базовыми величинами при оценке составных преобразователей назовём неизменные напряжение источника ( $V$ ) и ток потребителя ( $J$ ), а в качестве критериев для сравнения выберем напряжение на конденсаторе ( $U_C$ ) и ток в дросселе ( $I_L$ ), а

также напряжение на транзисторе ( $U_S$ ), полагая, что при прочих равных условиях названные параметры в значительной степени определяют массогабаритные и стоимостные показатели преобразователей.

Результаты анализа составных преобразователей приведены в табл. 2, где надстрочный символ \* использован для обозначения относительных значений (относительно упомянутых выше базовых величин), а коэффициент  $k$  равен отношению  $U/V$  и соответствует коэффициенту «трансформации» постоянного напряжения в инвертирующем базовом блоке.

Табл. 2 – Сравнительная оценка составных преобразователей

Наименование параметров (критериев)	Типы составных преобразователей	
	инвертирующий (рис. 3)	повышающий (рис. 4)
напряжение на конденсаторе	$U_{c3}^* = k$	$U_{c4}^* = 1 + 2k$
ток дросселя	$I_{L3}^* = 1 + k$	$I_{L4}^* = 0,5 + k$
напряжение на транзисторе	$U_{s3}^* = 1 + k$	$U_{s4}^* = 1 + 2k$

Приведенные соотношения очевидно следуют из сравнения схем составных преобразователей. Исключением, возможно, являются оценки тока дросселя и потому для их обоснования обратимся к табл.1, из которой для базовых структур следует:

$$I_{L1} = \frac{J_1}{1 - \gamma_1} = \frac{J_1 U_1}{V_1}; \quad I_{L2} = \frac{J_2}{1 - \gamma_2} = \frac{J_2 (V_2 + U_2)}{V_2}.$$

Учитывая особенности составных преобразователей, а именно:

$$V_1 = V_2 = V, \quad 2J_1 = J_2 = J, \quad U_1 = V + 2U, \quad U_2 = U,$$

и меняя подстрочные индексы (1 на 4 и 2 на 3), приходим к искомому выводу:

$$\frac{I_{L3}}{J} = \frac{V + U}{V}, \quad \frac{I_{L4}}{J} = \frac{V + 2U}{2V}.$$

Сравнение составных преобразователей с использованием табл. 2 показывает, что по уровню напряжения на силовых элементах инвертирующий преобразователь предпочтительнее повышающего, а по величине тока в дросселях (и силовых ключах) он незначительно уступает последнему, причём преимущества инвертирующего преобразователя тем заметнее, чем больше коэффициент трансформации  $k$ . В частности, уже при  $k=1$  напряжение на конденсаторах инвертирующего преобразователя меньше втрое, а на транзисторах – в полтора раза. При этом ток в дросселях (и транзисторах) инвертирующего преобразователя превышает соответствующий ток в повышающем преобразователе всего на одну треть.

#### Список литературы

1. Моин В.С. и Лаптев Н.Н. Стабилизированные транзисторные преобразователи. М., «Энергия», 1972.
2. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.: ил.
3. Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление. Справочное пособие: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.: ил.
4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие. – Изд. 3-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.