

## МНОГОВЫХОДНОЙ, АВТОНОМНЫЙ, ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ НА МОП - ТРАНЗИСТОРАХ

### Введение

Появление МОП ПТ, одного из семейств силовых транзисторов, позволило достичь существенного повышения надежности импульсных источников питания. Сегодня, когда все большее и большее количество изготовителей полупроводниковых приборов выходят на арену силовых МОП ПТ, первоначальные препятствия в виде высокой стоимости и малого наличия, в основном, исчезли. Несмотря на то, что большой кристалл МОП ПТ еще не сравнялся по цене с эквивалентным биполярным транзистором, преимущества внутренних характеристик МОП ПТ над биполярными транзисторами делают их применение более привлекательным, как показано в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение параметров БИП и МОП ПТ

Parameter	Bipolar	HEXFET
Switching Performance	Temperature Dependent	Temperature Independent
Switching Speed	100-500nSec	20-100nSec
Minority Carrier Storage	1-2 $\mu$ Sec	None
Peak Current Rating	Limited by Gain	Not Gain Limited
SOA	I <sub>S/B</sub> Limited	Power Limited Only
Drive	Current	Voltage
Drive Power	Up to 5W	None*
Reverse Bias	I <sub>B2</sub> Drive is required	None Required

\* Drive current is required to charge and discharge C<sub>iss</sub> but not to maintain drain current.

### Источник питания

Большая часть импульсных источников питания ставится в компьютеры разных размеров и типов. Все они работают от «стандартных» постоянных напряжений, и источник питания, описываемый здесь, создает такие напряжения. Компьютер среднего размера требует мощность до 250 Вт со следующими характеристиками:

- (1) Постоянное напряжение +5 В, ток от 10 до 20 А с полной пульсацией и нестабильностью  $\pm 50$  мВ, с защитой от перенапряжения.
- (2) Постоянное напряжение +12 В и -12 В, ток 0-1 А с полной пульсацией и нестабильностью  $\pm 100$  мВ.
- (3) Постоянное напряжение +26 В, ток 1-3 А с полной пульсацией и нестабильностью  $\pm 1$  В.
- (4) Диапазон входного переменного напряжения 95-130 В и 190-260 В при 48-420 Гц.

Защита от превышения тока будет требоваться на всех выходах, и источник питания должен иметь минимальный к.п.д. 75% при полной нагрузке. Другие требования, такие как соответствие стандартам и ослабление электромагнитных помех, также будут требоваться для большинства пользователей, но они хорошо отражены в другой литературе и в данной статье рассмотрены не будут.

### Схемный подход

Для обеспечения малой себестоимости, высокого к.п.д. и наивысшей достижимой надежности рассмотрены различные схемные решения, которые перечислены ниже:

- (1) Для уменьшения перегрузок по напряжению на большей части схемы, выбрана схема с запуском током.
- (2) Чтобы обеспечить лучшую стабильность выходов, не имеющих обратной связи, силовая (переключающая) схема работает при постоянном коэффициенте заполнения 50%.
- (3) Чтобы снизить число (и стоимость) магнитных компонентов, не использовались выходные фильтрующие дроссели, и единственный первичный индуктор выполняет двойную функцию: интегратора последовательности импульсов для входного стабилизатора и источника тока для силовой ключевой схемы.
- (4) Была выбрана рабочая частота 50 кГц как наилучший компромисс между стандартными магнитными конструкциями и минимальным размером (стоимостью) магнитных компонентов.
- (5) Была обеспечена работа от 115/230 В переменного напряжения с помощью удвоителя напряжения, чтобы питать номинальную шину постоянного напряжения 300В в режиме входного напряжения 115 В и обычный мостовой выпрямитель при входе 230 В.
- (6) Стабильность петли управления и сигнал отклика были улучшены использованием ШИМ (широтно-импульсной модуляции) с возможностью прямой передачи, так что изменения линейного напряжения стабилизировались независимо от управления замкнутой петлей.



### Входной выпрямитель

Возможность удвоения входного напряжения достигается применением диодного моста с разделяющими фильтрующими конденсаторами, как показано на рис.2. В режиме низкого входного напряжения (переменное 115 В) переменное напряжение подается между одним из входов линии L1 или L2 и нейтралью N. Фильтрующие конденсаторы C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub> каждый заряжается до пикового напряжения переменного сигнала (примерно 150 В постоянного при переменном входе 110 В) и, так как они включены последовательно, полное постоянное нестабилизированное напряжение составляет около 300 В. Когда на входе используется переменное напряжение 230 В, L1 и L2 становятся входными клеммами, а выпрямитель работает как обычная мостовая схема, опять вырабатывая постоянное напряжение 300 В на C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub>. Спонтанные всплески тока уменьшаются ограничивающими всплески термисторами, которые, благодаря отрицательному температурному коэффициенту, минимизируют рассеиваемую на них мощность при стабильных условиях работы.

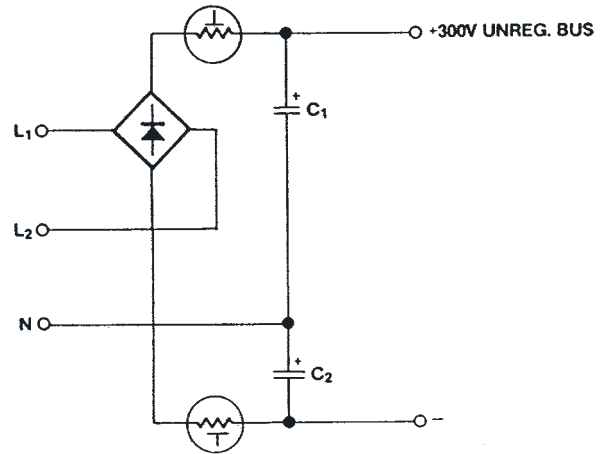


Рис. 2. Схема входного выпрямителя

### Обратноходовой стабилизатор, работающий на частоте 50 кГц

Стабилизация выходных напряжений от воздействий входной сети, нагрузки и температуры выполняется каскадом стабилизатора источника питания. Запускающие сигналы с модулируемой шириной импульса подаются на Q<sub>1</sub> и Q<sub>2</sub>, которые находятся в проводящем состоянии в противоположные полупериоды запускающего сигнала. На первый взгляд может показаться, что функция переключения может выполняться одиночным транзистором - и действительно может - но это тогда, когда нет требования к изменению коэффициента заполнения от 0 до почти 100%, что вызывает серьезные проблемы с конструкцией запускающего трансформатора. В дополнение к широкому диапазону коэффициента заполнения двухтранзисторная схема имеет два отдельных пути отвода тепла для рассеивания мощности. Это позволяет использовать меньшие МОП ПТ с меньшими затратами на приборы плюс намного меньшую схему запуска.

*ПРИМЕЧАНИЕ.* Дешевле использовать два МОП ПТ меньшего размера, чем один с вдвое большей активной площадью. Обратите также внимание, что переключающие элементы (ключи) размещены в отрицательной шине, так что пики напряжения переключения не появляются в схеме запуска или трансформаторе тока. Последовательность импульсов, появляясь на индукторе L1, имеет частоту 100 кГц и коммутируется диодом CR<sub>1</sub>. Фильтрующий конденсатор постоянного напряжения не используется на выходе стабилизатора, так как требуется, чтобы он имел высокий выходной импеданс для схемы инвертора, которая следует за ним.

### Мостовой преобразователь с частотой 50 кГц

В питаемом током преобразователе выходная переключающая схема должна иметь следующие свойства:

- (1) Ток в шине постоянного напряжения протекает непрерывно (в идеале).
- (2) Постоянное напряжение шины должно резко падать при постоянном токе.
- (3) Постоянное напряжение шины питания должно ограничиваться от переходных процессов так, чтобы в условиях высокого импеданса из-за индуктивности силового трансформатора не вызывать перенапряжения на шине.

Была использована схема полного моста (хотя могла бы применяться пушпульная схема) из-за ее меньшей перегрузки по переключаемому напряжению и ее коэффициента использования трансформатора. Кроме того, так как МОП ПТ - это приборы, запускаемые напряжением, трансформаторная схема запуска проста.

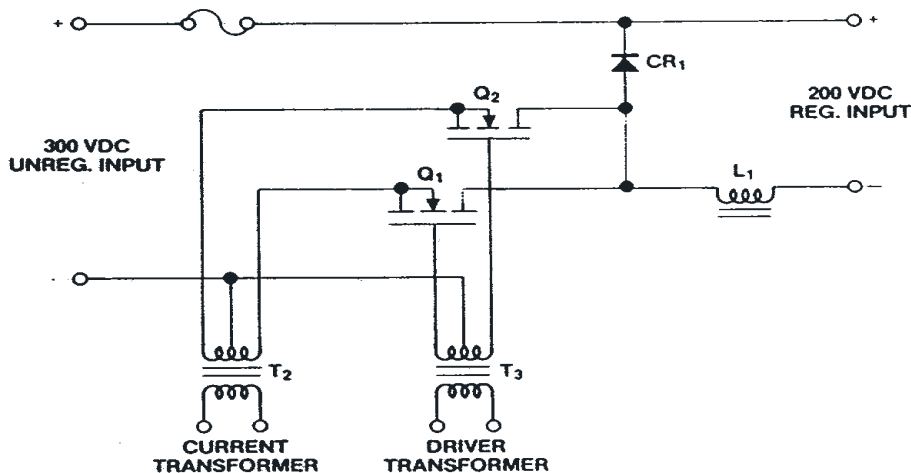


Рис. 3. Преобразователь с регулировкой напряжения

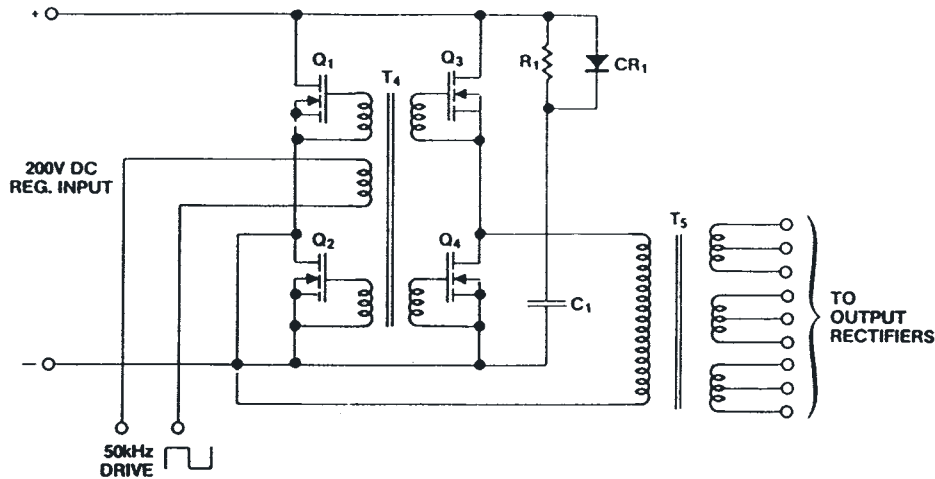


Рис. 4. Схема мостового преобразователя

Отметьте также, что в случае питаемых током преобразователей с модуляцией ширины импульса, в отличие от питаемых напряжением, силовой трансформатор всегда обрабатывает назад в замкнутые ключи, питая первичную обмотку, так что нет необходимости устанавливать коммутирующие диоды на каждом силовом ключе. Мостовая схема выдает выходное переменное напряжение такой же величины, как и входная шина постоянного напряжения (примерно) и запускается так, что  $Q_1$  и  $Q_3$  находятся в проводящем состоянии в течение одной половины периода, а  $Q_2$  и  $Q_4$  проводят в течение другой половины. Таким образом, рассеиваемая мощность делится между всеми силовыми приборами, которые теперь могут иметь половинную активную площадь кристалла по сравнению с площадью кристалла, которая потребовалась бы при схеме с двумя транзисторами. Как уже отмечалось ранее, это может сэкономить затраты по сравнению с двумя приборами с эквивалентной суммарной площадью кристаллов. У любого силового трансформатора всегда присутствует индуктивность, и в случае преобразователя, запускаемого током, высокий импеданс истока силового ключа вызывает появление выбросов напряжения на шине постоянного питания во время переходных процессов переключения. Ограничитель выбросов, состоящий из  $R_1$ ,  $C_1$ , и  $CR_1$  и подключенный прямо к шине постоянного напряжения, эффективно ослабляет эти выбросы, благодаря своему низкому импедансу для переходных процессов. Мощность, рассеиваемая в  $R_1$ , прямо пропорциональна величине индуктивности  $T_5$ , поэтому является важным минимизировать ее путем правильной конструкции магнитопровода (рассмотрено далее).

### Выходные выпрямители и фильтры

Одним из главных преимуществ питания током преобразователя прямоугольных импульсов является то, что все выходные напряжения вторичной обмотки силового трансформатора являются точными функциями только соотношения витков и, следовательно, совсем не требуется дополнительных норм к обратному напряжению выпрямительных диодов, связанных с входной линией переменного напряжения. Практически это означает, что можно использовать 45-вольтовые выпрямительные диоды Шоттки для всех выходных напряжений этого источника питания, как показано на рис.5. Отметьте отсутствие фильтрующих дросселей во всех выходах постоянного напряжения. В схеме с токовым запуском фильтрующие дроссели заменяются одним индуктором в первичном (входном) каскаде схемы переключения. Из-за грубого распределения напряжения на виток в силовом трансформаторе (примерно 5,6 В на виток) необходимо стабилизировать 12-вольтовые выходы с помощью трех оконечных стабилизаторов выходного постоянного напряжения. Однако, так как выходные напряжения трансформатора не зависят от изменений переменного напряжения сети, превышающие напряжения 12-вольтовых стабилизаторов малы и к.п.д. серьезно не ухудшается. Выход +26 вольт получается из входного напряжения 12-вольтового стабилизатора (примерно 16,2 В постоянного напряжения), к которому добавляется другое

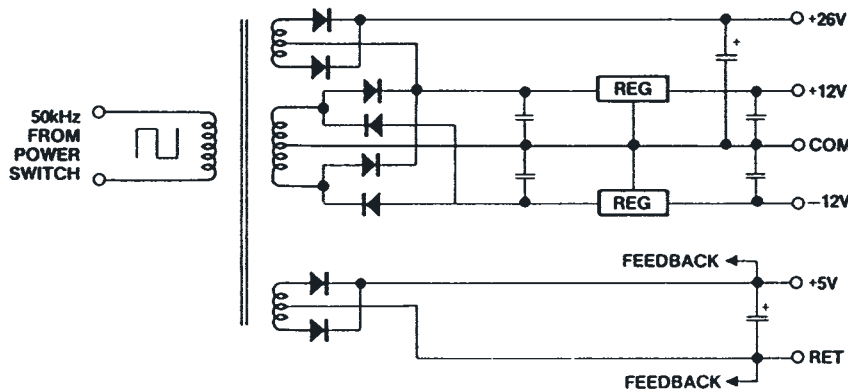


Рис. 5. Схема выхода

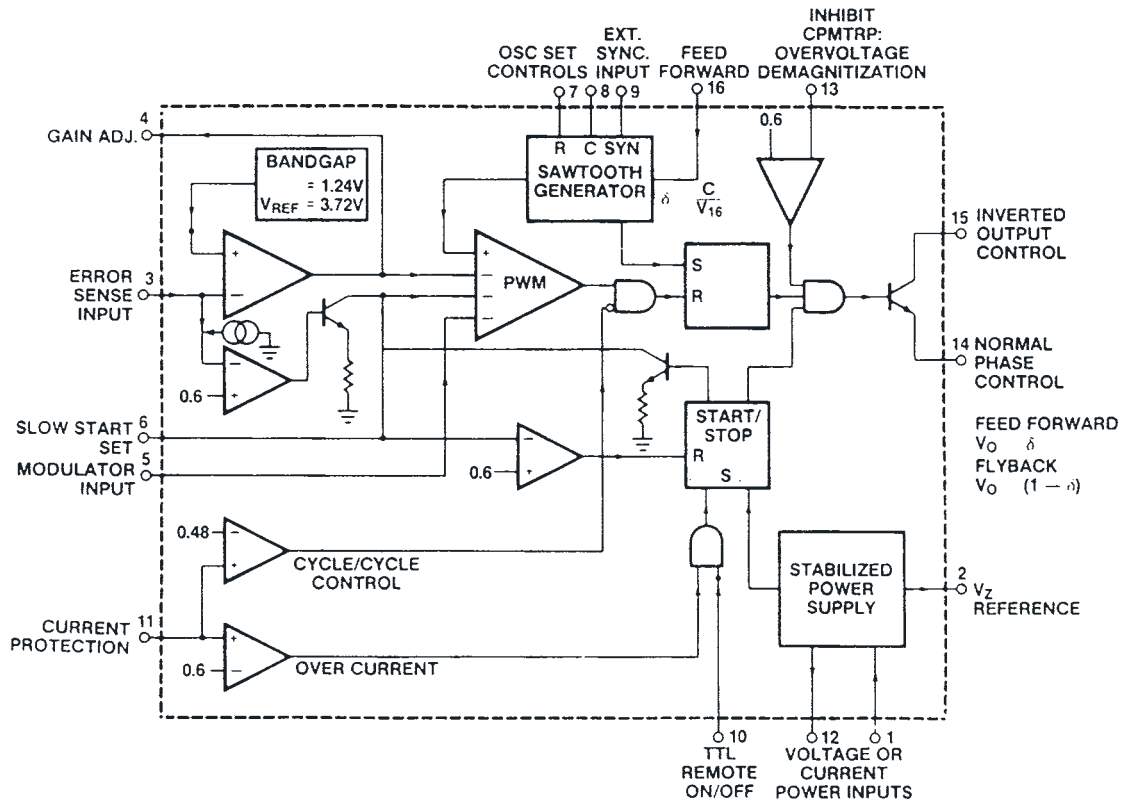


Рис. 6. Схема широтно-импульсного модулятора (ШИМ)

выпрямленное постоянное напряжение выхода 10,6 В, что создает общее напряжение около 26,8 В. Обратите внимание, что выпрямительные диоды Шоттки здесь тоже используются. Так как основная часть выходной мощности находится в выходе 5 В, напряжение обратной связи для стабилизации берется из этого выхода.

### ШИМ и схемы запуска

Рис.6 - это блок-схема схемы управления широтно-импульсного модулятора Signetics NE5560. В дополнение к обычным функциям аналоговый сигнал - ширина импульса. Эта схема управления имеет функцию передачи вперед, которая позволяет иметь постоянный вольт-секундный выход, являющийся очень желательной характеристикой, так как он снижает требования по усилению к функции управления замкнутым контуром и, следовательно, делает стабилизацию этого управляющего контура намного проще. В этом источнике питания напряжение для питания управления подается от источника постоянного напряжения, получаемого от малого трансформатора (см. рис.1).

Выходная последовательность импульсов ШИМ модулятора имеет частоту 100 кГц и используется для срабатывания двойного триггера (DM7473), чтобы создавать требуемый сигнал запуска с частотой 50 кГц. Требуется два различных запускающих сигнала: для обратногоходового стабилизатора и для мостового преобразователя. Информация о ширине импульса в форме сигнала переменного напряжения с частотой 50 кГц создается двойным И-НЕ вентилем с мощным выходным каскадом (DM75361). Входами для этого вентиля является сигнал ШИМ от NE5560 и выход в виде прямоугольных импульсов от одного из триггеров DM7473.

Второй сигнал запуска для мостового преобразователя - это 50% меандр, который берется от другого выхода DM7473, запускающий драйвер DS0026, который создает необходимый сигнал управления для мостового преобразователя. При запуске силовых МОП ПТ через запускающие трансформаторы важно поддерживать точность запускающего сигнала, так как МОП ПТ может быть легко поврежден превышающими напряжением затвора выбросами из-за плохой конструкции трансформатора схемы запуска или когда схема запуска имеет неуправляемые выходы с высоким импедансом. Схемы запуска (драйверы) в источнике питания (DS75361 и DS00026) обе имеют пушпульные выходные каскады, которые всегда создают низкий импеданс для запускающих трансформаторов. Кроме того, постоянное напряжение питания этих драйверов стабилизируется на 12 вольтах, так что при высоком или низком состоянии переменного напряжения входной линии амплитуда запуска остается постоянной.

### Конструкция магнитных компонентов

Выбор рабочей частоты в большой мере зависит от типов и сложности магнитных компонентов. В отличие от трансформаторов синусоидального сигнала, импульсные источники питания требуют конструкции с широкой полосой диапазона частот, способной поддерживать не только основные частоты переключения, но также сигналы с быстрыми фронтами, присутствующие при эффективной передаче мощности. Развязка по току, получаемая с помощью трансформаторов, применяется не только для условий постоянного напряжения, но более важна для условий переключения, где емкостные связи между обмотками или даже внутри обмотки могут вызывать нежелательный «звон» или выбросы обычного типа.

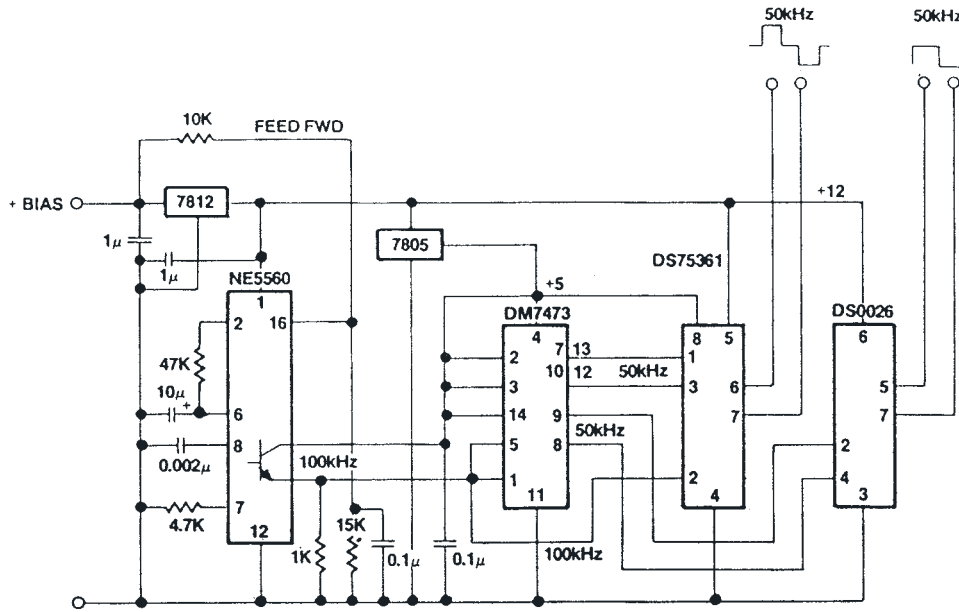


Рис. 7. ШИМ и схема запуска (драйвер)

Если частоты переключения слишком высоки, индуктивности приводят к неэффективной работе, из-за рассеивания мощности в схемах гашения, требуемых для контроля за выбросами напряжения. И наоборот, если частоты переключения слишком малы, магнитные компоненты имеют большой размер, а увеличившееся количество обмоток добавляется к проблемам обычного рода, не говоря уже о дополнительной стоимости самих магнитных компонентов. По вышеуказанным причинам было решено, что 50 кГц будет удовлетворительным компромиссом между размером, простотой обмоток, имеющимися сердечниками и стоимостью

### Трансформатор тока T2

Ток из шины нестабилизированного постоянного напряжения считывается трансформатором тока (рис.8), включенного последовательно с переключающими транзисторами обратного стабилизатора. Первичная обмотка этого тороидального трансформатора показана в виде обмотки с отводом от средней точки (см. рис.3), но на практике эта обмотка выполняется пропусканием выводов соединения истоков только через сердечник, формируя таким образом первичную обмотку. Случаются ошибки в считывании тока из-за изменений тока намагничивания при изменении уровня магнитного потока, и по этой причине два соображения конструкции являются важными:

- (1) Петля гистерезиса должна быть достаточно узкой, чтобы ток намагничивания был мал и можно было измерять малые токи.
- (2) Уровень магнитного потока конструкции должен быть также мал, чтобы минимизировались ошибки считывания тока.

Использование двух переключающих транзисторов в стабилизаторе позволяет осуществить простой метод восстановления сердечника, благодаря созданию переменных сигналов магнитного потока. Вторичная обмотка - это бифилярная обмотка, занимающая 360° сердечника так, что магнитный поток сердечника распределяется равномерно и можно выполнить отвод от средней точки. Сердечник - это обмотанный лентой тороид из Square Permalloy 80, который обеспечивает необходимые высокую чувствительность и линейность.

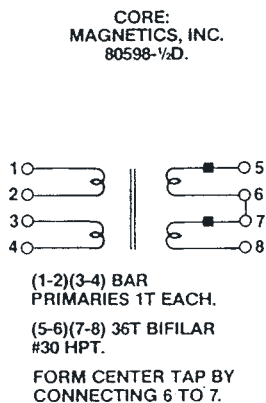


Рис. 8. Трансформатор тока T<sub>2</sub>

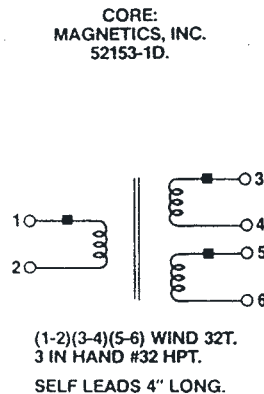


Рис. 9. Запускающий трансформатор T<sub>3</sub>  
(ШИМ)

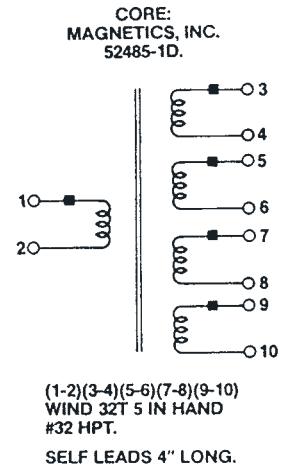


Рис. 10. Запускающий трансформатор  
T<sub>4</sub> (мост)



### Запускающие трансформаторы T3 и T4

Из-за необходимости создания точных сигналов переключения в затворах МОП ПТ, являющихся емкостной нагрузкой, нужно сконструировать запускающие трансформаторы со следующими задачами:

- (1) Максимально возможная ширина полосы путем снижения индуктивности.
- (2) Минимальная возможная индуктивность за счет:
  - (а) единичного соотношения витков
  - (б) тороидальных беззазорных сердечников
  - (в) мультифилярных обмоток, занимающих 360°
- (3) Минимальное число витков, чтобы снизить емкости обмоток и потери в меди.
- (4) Сердечники с малыми диаметрами и узкими кривыми гистерезиса, чтобы снизить токи намагничивания до абсолютного минимума.
- (5) Подбор материалов сердечников для достижения малых потерь из-за вихревых токов и высоких мощностей потока при 50 кГц.

### Силовой трансформатор T5

Из-за неточности в процессе формирования конструкции обмотки, работающей на высокой рабочей частоте, разработка трансформатора (рис.11) выполняется в следующей последовательности:

- (1) Определите напряжение вторичной обмотки для выхода постоянного напряжения 5 В при полной нагрузке (5 Вольт + падение на одном диоде).
- (2) Выберите размер сердечника, основываясь на одновитковой обмотке при плотности потока около 2 кГс.
- (3) Рассчитайте соотношение витков для других вторичных обмоток.
- (4) Рассчитайте витки первичной обмотки для входного постоянного напряжения 200 В силового мостового каскада. (Это соответствует условию минимального коэффициента заполнения ШИМ при переменном напряжении входной линии 95 В.)

### Индуктор L<sub>1</sub>

Одним из уникальных свойств этой конструкции является наличие одиночного индуктора для выполнения различных функций:

- \* Интегрирование импульсов тока перед стабилизацией для стационарного режима.
- \* Подача тока высокого импеданса на выходной мост.
- \* Фильтр пульсаций/выбросов для всех выходов, позволяющий иметь напряжения ескольких выходов, как функции соотношения витков T5.

Величина индуктивности была выбрана, чтобы получить величину di/dt равную 0,5 А/ мксек. Таким образом, при низком напряжении линии (95 В) нестабилизированное напряжение шины составляет примерно 260 В постоянное. При стабилизированном выходном напряжении к силовому мостовому каскаду равному 200 В постоянного:

$$\Delta V = 60 \text{ В}$$

При частоте переключения 100 кГц перед стабилизатором:

$$T = 10 \text{ мкс}$$

Если D = 0,8, тогда

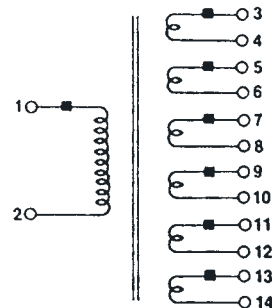
$$T_{ON} = 8 \text{ мкс}$$

Полагая для определенности ток равным 2 А, имеем:

$$L = (V \times T_{ON}) / 2 \text{ А} = (60 \text{ В} \times 8 \text{ мкс}) / 2 = 240 \text{ мкГн}$$

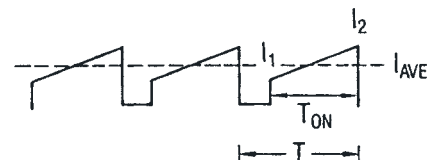
При подаче выходной мощности 230 Вт, постоянный вход мостового силового каскада потребляет примерно 250 Вт при 200 В, это дает средний ток 1,25 А.

CORE:  
TDK #H7C1PQ26/25Z-12.  
BOBBIN:  
TDK #BPQ26/25-0112DS.  
MOUNTING CLIP:  
TDK #FPQ26/25A.



- (1-2) WIND 32T, 2 LAYERS, 3 IN HAND #30 HPT. INSULATE AYERS WITH 0.02 MYLAR TAPE. TERMINATE TO BOBBIN TERMINALS.
- (3-4)(5-6) WIND 3T BIFILAR #20 HPT. } 1 LAYER  
(7-8)(9-10) WIND 2T BIFILAR #20 HPT. } INSULATE LAYER WITH 0.02 MYLAR TAPE. TERMINATE TO BOBBIN TERMINALS.
- (11-12) SINGLE TURN FORMED BY U-SHAPED COPPER STRIP 0.5 X 0.031. INSULATE BOTH SIDES WITH 0.02 ADHESIVE MYLAR TAPE.
- (13-14) SINGLE TURN SAME AS (11-12).

Рис. 11. Силовой трансформатор T<sub>5</sub>



$$I_{AVE} = I_1 \times D + \frac{I_2 \times D}{2}$$

$$I_1 + 2A = I_2$$

$$I_{AVE} = 1.25 = 0.8I_1 + 0.4(I_1 + 2)$$

$$I_1 = 0.375A$$

$$I_2 = 2.375A$$



- (1-2) WIND 44T #20 HAPT. GAP SPACER 0.02" (TOTAL GAP 0.04").

Рис. 12. Индуктивность L<sub>1</sub>

### **Заключение**

Хотя намерением этой статьи не являлось создание рецепта из «поварской книги» для оптимального источника питания, выбранный подход иллюстрирует использование малых (с низкой стоимостью) МОП ПТ для работы с существенными мощностями. Схема токового драйвера минимизирует электрические перегрузки на силовых переключающих приборах и повышает надежность, благодаря работе всех активных и пассивных компонентов в силовой цепочке.

Был получен общий к.п.д. 75% при полной нагрузке и управляющий контур был стабилен для всех условий входной линии и нагрузки.

Для оригинальной 230-ваттной конструкции был выбран МОП ПТ IRF720, но более высокие уровни мощности могут быть осуществлены простым подбором соответствующих размеров компонентов мощностной цепочки - генератор сигналов и компоненты запуска будут оставаться те же.