

## ПРИНЦИП КОНСТРУИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ СЕТЕВЫХ ОБРАТНОХОДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ TOPSWITCH

### Введение

Развитие полупроводниковой технологии MOSFET обусловило широкое применение дискретных полупроводниковых ключей в импульсных источниках питания. Несмотря на эффективность и уменьшение массогабаритных параметров, первые импульсные источники питания требовали большего количества электронных компонентов, что приводило к удорожанию устройств и снижению их надежности [1].

За последние полтора десятилетия обратноходовые преобразователи напряжения заняли широкую нишу в семействе импульсных источников питания. Обратноходовые преобразователи используются в самых различных классах приборов, начиная от компьютерной техники и бытовой электроники и заканчивая медицинским и аэрокосмическим оборудованием. Благодаря развитию полупроводниковых технологий появилась возможность создания так называемых «интеллектуальных ключей» – интегральных схем, объединяющих в себе основные элементы преобразователя [2]. Интеллектуальные ключи позволяют значительно упростить разработку источника питания, снижают риск выхода из строя источника, дают возможность повысить КПД устройства за счет совершенствования топологии ИС.

На сегодняшний день существует несколько фирм-производителей интеллектуальных ключей: Power Integrations, Texas Instruments, ST-Microelectronics, International Rectifier, Fairchild, среди которых лидирующую позицию занимает Power Integrations.

Правильность расчета электрических и конструктивных параметров импульсных трансформаторов гарантируют минимальные потери как в самом трансформаторе, так и в интеллектуальных ключах. Существующие методы расчета импульсных трансформаторов имеют ряд недостатков, главным из которых является то, что они предназначены для расчета двухтактных преобразователей и не учитывают особенности схемотехники обратноходовых преобразователей электроэнергии [1].

Целью статьи – разработка методики расчета импульсных трансформаторов для обратноходовых преобразователей, сделанных на основе ИС семейства TOPSwitch.

### Расчет трансформатора

Особенностью обратноходовых преобразователей является то, что в цикле прямого хода ключа энергия первичной обмотки трансформатора передается в сердечник, а в цикле обратного хода ключа – энергия из сердечника передается во вторичную обмотку трансформатора и в нагрузку. Таким образом, расчет количества витков в обмотках определяется, исходя из необходимой величины индуктивностей обмоток [4]. В свою очередь индуктивность обмоток может быть определена по передаваемой в нагрузку энергии.

Энергия, запасенная в трансформаторе в момент нахождения встроенного в ИС силового ключа, определяется из формулы

$$A = \frac{P_{\text{вых}}}{\eta \cdot f},$$

где  $P_{\text{вых}}$  – выходная мощность;  $\eta$  – КПД преобразователя;  $f$  – частота преобразования.

Импульсный ток первичной обмотки трансформатора

$$I_1 = \sqrt{\frac{A \cdot 2}{L_1}} = \sqrt{\frac{P_{\text{вых}} \cdot 2}{\eta \cdot f \cdot L_1}},$$

где  $L_1$  – индуктивность первичной обмотки трансформатора.

Поскольку изменение тока в первичной обмотке трансформатора определяется входным напряжением, приведенным к индуктивности первичной обмотки, то импульсный ток можно определить как

$$I_1 = \frac{V_1 \cdot t_{ON}}{L_1}$$

где  $t_{ON}$  – временное значение длительности импульса, или время нахождения встроенного в ИС силового ключа во включенном состоянии.

Трансформатор рассчитывается исходя из оптимального условия работы источника питания, при котором коэффициент заполнения импульса  $\gamma$  равен 0.5.

Скомбинировав эту формулу с предыдущей, при условии минимального входного напряжения и минимальной частоты преобразования можно получить значение индуктивности первичной обмотки:

$$L_1 = \frac{(V_{1MIN})^2 \cdot (t_{ON})^2 \cdot \eta \cdot f_{MIN}}{2 \cdot P_{ВЫЛ}}$$

где  $V_{1MIN}$  – минимальное входное напряжение (выбирается равным 200В),  $f_{MIN}$  – минимальное значение частоты преобразования (выбирается равным  $f - 5\%$ ).

Ток в первичной обмотке можно определить по известной величине ее индуктивности:

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_{ВЫЛ} \cdot 2}{\eta \cdot f \cdot L_1}}$$

Среднеквадратичное значение тока первичной обмотки [2]:

$$I_{\text{К1}} = I_1 \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{MAX}}{3}}$$

За время нахождения встроенного в ИС силового ключа в выключенном состоянии накопленная в сердечнике энергия должна перейти в выходной конденсатор источника питания и нагрузку. Поскольку выходное напряжение выпрямляется, то учитывается падение напряжения на выпрямителе. Таким образом, энергия, запасенная в трансформаторе и переходящая в нагрузку,

$$A = \frac{P_{ВЫЛ}}{f} = \frac{(V_2 + V_D) \cdot I_2}{f} = \frac{L_2 \cdot I_2^2}{2}$$

где  $V_2$  – выходное напряжение,  $V_D$  – падение напряжения на диоде (0,2..0,6 В).  $L_2$  – индуктивность вторичной обмотки,  $I_2$  – ток вторичной обмотки.

При условии минимальной частоты выходное напряжение может быть определено как изменение выходного тока за время нахождения встроенного в ИС силового ключа в выключенном состоянии:

$$V_2 + V_D = L_2 \frac{I_2}{t_{OFF}}$$

где  $t_{OFF}$  – время нахождения встроенного в ИС силового ключа в выключенном состоянии.

Скомбинировав эти формулы, можно определить индуктивность вторичной обмотки:

$$L_2 = \frac{2 \cdot (V_2 + V_D) \cdot (t_{OFF})^2 \cdot f_{MIN}}{I_2}$$

Ток во вторичной обмотке

$$I_2 = \frac{(V_2 + V_D) \cdot (t_{OFF})^2}{L_2}$$

Определим коэффициент трансформации через индуктивность обмоток:

$$K = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$$

Зная коэффициент трансформации, можно определить напряжение на встроенном в ИС ключе (без учета индуктивного выброса):

$$V_{\text{IK}} = V_{\text{INMAX}} + (V_2 + V_D) \cdot K,$$

где  $V_{\text{INMAX}}$  - максимальное значение входного напряжения (соответствует максимальному значению сетевого напряжения 264В и составляет 373В).

Согласно паспортным данным для ИС серии TOPSwitch, пробивное напряжение встроенного ключа составляет 700В [5]. В некоторых случаях расчетная величина напряжения  $V_{\text{IK}}$  может оказаться слишком большой, что в свою очередь приводит к необходимости коррекции индуктивностей и токов обмоток. Для коррекции величины допустимого напряжения коэффициент трансформации вычисляется исходя из максимальной индуктивности первичной обмотки трансформатора, допустимой для конкретной ИС.

После определения индуктивности первичной и вторичных обмоток необходимо выбрать типоразмер сердечника трансформатора с учетом частоты преобразования и выходной мощности. Для широкого диапазона частот чаще всего применяется магнитный материал №87, производства EPCOS [6], либо его аналог 3С90 производства Ferroxcube [7].

В рекомендациях для расчетов «TOPSwitch® Flyback Transformer Construction Guide» [8] приводится перечень формфакторов и типоразмеров различных сердечников для трансформаторов.

Как было указано выше, сердечник должен иметь немагнитный зазор керна. Наличие зазора керна приводит к уменьшению общей магнитной проницаемости и, как следствие, к уменьшению коэффициента индуктивности – квадратичного показателя, определяющего индуктивность одного витка. Значение коэффициента индуктивности после введения немагнитного зазора  $A_L^*$  можно вычислить таким образом:

$$A_L^* = \frac{A_L \cdot l_l}{\mu_l \cdot g},$$

где  $A_L$  - начальное значение коэффициента индуктивности,  $l_l$  - длина средней силовой линии сердечника,  $\mu_l$  - начальная магнитная проницаемость материала,  $g$  - общая ширина немагнитного зазора керна.

Сердечники различных типоразмеров, как правило, производятся различных видов: без зазора и с зазором.

Следует отметить, что данные значения  $A_L^*$  и  $\mu_l$  получаются при наличии общего немагнитного зазора. При необходимости получения иных значений  $A_L^*$  можно комбинировать сердечники с различными зазорами, но для этого надо пересчитывать коэффициент индуктивности.

Количество витков в первичной обмотке

$$N_1 = \sqrt{\frac{L_1}{A_L^*}}$$

После определения количества витков в первичной обмотке следует проверить, не превышает ли расчетный размах индукции максимально возможного значения для конкретного магнитного материала. Размах индукции за время закачки энергии в сердечник

$$\Delta B = \frac{V_{\text{IMIN}} \cdot t_{\text{ON}}}{S_c \cdot N_1},$$

где  $S_c$  – площадь сечения магнитопровода.

Количество витков во вторичной обмотке определяется так же, как и для первичной:

$$N_2 = \sqrt{\frac{L_2}{A_l^*}}$$

Обмотка смещения рассчитывается исходя из необходимого напряжения, которое, для семейства ИС TOPSwitch составляет 9 – 12В [3]. Согласно документации, выходной ток обмотки смещения составляет не более 100мА. Поскольку эта величина значительно меньше величины выходного тока, то вторичную обмотку можно рассчитать по ее напряжению:

$$N_{сМ} = \frac{(V_{сМ} + V_{пХМ}) \cdot N_2}{V_2 + V_D}$$

где  $V_{сМ}$  - напряжение смещения.  $V_{пХМ}$  - падение напряжения на диоде смещения.

### Пример расчета

Пусть требуется рассчитать импульсный трансформатор, предназначенный для работы в импульсном источнике питания, сделанном на основе ИС TOP246Y. Входное напряжение – напряжение промышленной сети 220В. Выходное напряжение 12В и выходной ток 3,3А. Преобразователь работает на полной частоте 132кГц. Обмотки наматываются медными проводами. Плотность тока в меди  $j$  равна 10А/мм<sup>2</sup>.

Будем считать, что трансформатор должен находиться в режиме разрывных токов при перегрузке в 20 %, а также, что в режиме регулирования напряжения не возникнет проблем с петлей обратной связи, и не возникнет дополнительных неучтенных динамических потерь во встроенном в ИС ключе при его открывании.

Определим минимальное значение частоты преобразователя, которое составляет соответственно 95 % от номинального значения [14]:

$$f_{MIN} = f \cdot 95\% = 125,4(\text{кГц}).$$

Время закачки энергии в трансформатор определяется длительностью импульса и задержкой включения и выключения встроенного в ИС транзистора, на величину которой отводится 4 – 7 % от общего времени прямого хода, то есть:

$$\tau_{ОН} = \frac{T}{2} \cdot 95\%.$$

Определим время закачки энергии в трансформатор (время прямого хода ключа) [14]:

$$t_{ОН} = \frac{1}{2 \cdot f} \cdot 95\% = 3,9 \cdot 10^{-6}(\text{с}).$$

Определим индуктивность первичной обмотки:

$$L_1 = \frac{(V_{MIN})^2 \cdot (t_{ОН})^2 \cdot \eta \cdot f_{MIN}}{2 \cdot P_{ВЫЛ}} = 827(\text{мкГн}).$$

Определим время обратного хода ключа [14]:

$$t_{ОТ} = (T - t_{ОН}) \cdot 95\% = 3,6 \cdot 10^{-6}(\text{с}).$$

В качестве выпрямителя выберем ультрабыстрый диод STPS1045 [13]. Определим индуктивность вторичной обмотки:

$$L_2 = \frac{2 \cdot (V_2 + V_D) \cdot (t_{ОТ})^2 \cdot f_{MIN}}{I_2} \approx 12(\text{мкГн}).$$

В качестве сердечника для источника питания с мощностью до 50 Вт может быть использован сердечник из ряда E130, EDT29, EER35 [12]. Наиболее доступным среди них является сердечник ETD29. В табл. 1 приведены значения  $A_l^*$  и  $\mu_r$  при разных величинах ширины немагнитного зазора керна на примере сердечника ETD29 производства EPCOS [15].

Таблица 1

$g, \text{мм}$	$A_l^*, \text{нГн/вит}^2$	$\mu, \text{ГН/м}$
$0,1 \pm 0,02$	621	457
$0,2 \pm 0,02$	483	281
$0,5 \pm 0,05$	201	148
$1 \pm 0,05$	124	91

В качестве сердечника возьмем сердечник с зазором 0,2мм, для которого величина коэффициента индуктивности составляет 483нГн/вит<sup>2</sup>.

Определим количество витков в обмотках:

$$N_1 = \sqrt{\frac{L_1}{A_l^*}} \approx 41(\text{вит}), \quad N_2 = \sqrt{\frac{L_2}{A_l^*}} \approx 5(\text{вит}), \quad N_{L_M} = \frac{(V_{L_M} + V_{L_{KM}}) \cdot N_2}{V_2 + V_D} = 4(\text{вит}).$$

Коэффициент трансформации

$$k = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = 8,3.$$

Определим максимальный ток первичной обмотки:

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_{\text{ВЫХ}} \cdot 2}{\eta \cdot f_{\text{МАГ}} \cdot L_1}} \approx 1(\text{А}).$$

Определим среднеквадратичное значение тока первичной обмотки:

$$I_1 = I_1 \sqrt{\frac{Y}{3}} = 408(\text{мА}).$$

Определим ток вторичной обмотки:

$$I_2 = I_1 \cdot k = 7,5(\text{А}).$$

Выберем провод для первичной обмотки. Ширина катушки составляет 20мм [15]. Диаметр провода с изоляцией

$$d_1 = \frac{S_K}{N_1} = 0,5(\text{мм}).$$

Наиболее близким по диаметру является провод диаметром 0,5мм (№24 по стандарту AWG) с эмалевым покрытием, удельным сопротивлением 0,4Ом/м [12].

Определим глубину скин-слоя для заданной частоты:

$$D_s = \frac{7,5}{\sqrt{f}} = \frac{7,5}{363,3} = 0,2(\text{мм}).$$

Следует отметить, что при данной глубине скин-слоя диаметр 0,55мм является избыточным. В подобных случаях намотка ведется проводом оптимального диаметра, с таким расчетом, чтоб расстояния от намотки до бортов катушки оказывались одинаковыми.

Выберем сечение провода вторичной обмотки:

$$S_2 = \frac{I_2}{j} = \frac{3}{10} \approx 0,3(\text{мм}^2).$$

С учетом скин-эффекта рационально использовать бифилярную либо трифилярную намотку.

Для данной глубины скин-слоя оптимальным будет намотка обмотки проводами диаметром 0,32мм (№28 по стандарту AWG) с удельным сопротивлением 1,2Ом/м [12]. Определим площадь сечения одной жилы:

$$S_s = \pi \frac{d^2}{2} = 0,2(\text{мм}^2).$$

Таким образом, намотка вторичной обмотки может вестись двумя жилами диаметром 0,32мм.

## Выводы

Приведен метод расчета электрических и точечных параметров импульсных трансформаторов, предназначенных для работы в сетевых источниках питания, сделанных на ИС TOPSwitch.

При расчете трансформатора были использованы параметры современных магнитных материалов, в частности - феррита производства EPCOS. Это имеет ряд преимуществ, главным из которых является доступность необходимых параметров и характеристик как самого материала, так и конкретных сердечников.

Имеющийся у автора опыт показал, что при изготовлении трансформаторов (особенно для больших выходных токов) в качестве провода вторичной обмотки целесообразно использовать не литцендрат, а тонкую ленту. Это позволяет «усреднить» импеданс обмотки по всей ширине ленты, в результате чего в различных участках обмотки протекают равные токи, что минимизирует скин-эффект; а также снизить потери в обмотке, возникающие вследствие сильной дивергенции магнитного поля по краям обмотки.

**Литература** 1. Б.Ю. Семенов. Силовая электроника: от простого к сложному. М.: СОЛОН-Пресс. 2005. 416с. 2. *Switchmode power supplies. Reference manual and design guide.* ON semiconductor. 2000. 65p. 3. *TOP252-261 TOPSwitch-HX Family. Power Intergations.* 2008. 48p. 4. *Flyback transformer design for TOPSwitch® power supplies.* Power Intergations. 1996. 12p. 5. *TOPSwitch Tips, Techniques, and Troubleshooting Guide.* Power Intergations. 1996. 28p. 6. *Ferrites and accessories. Materials.* EPCOS AG. 2006. 77p. 7. *3C90 Material specification.* Ferroxcube. 2004. 4p. 8. *TOPSwitch flyback transformer construction guide.* Power Intergations, 1996. 32p. 9. *Lloyd H., Dixon Jr. Widdy current losses in transformer. Winding and circuit wiring.* Texas Instruments. 2003. 13p. 10. *Зоммерфельд А. Электродинамика: Пер. с нем. С.А. Элькинда.* М.: Изд-во иностр. лит. 1958. 505с. 11. *TOPSwitch-II flyback quick selection curves.* Power Intergations. 1998. 8p. 12. *Inductor and fly-back. Transformer design.* Texas Instruments. 2001. 20p. 13. *STPS1045D/F/FP Power schottky rectifier.* ST-Microelectronics. 2003. 6p. 14. *TOPSwitch-II flyback quick design methodology.* Power Intergations. 1996. 32p. 15. *Ferrites and accessories. ETD 29/16/10. Core and accessories.* 2006. 7 p.

Харьковский национальный  
университет радиотехники

Поступила в редакцию 11.06.2008