

АНАЛИЗ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ДЛЯ СЕТЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ TOPSWITCH

Введение

За последние полтора десятилетия обратноходовые преобразователи напряжения заняли широкую нишу в семействе импульсных источников питания [1]. 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 за счёт малого количества элементов обвязки, снижают риск выхода из строя источника питания за счёт введения универсальных цепей защиты, дают возможность повысить КПД устройства за счёт совершенствования топологии ИС.

Наиболее актуальной задачей при разработке преобразователей электрической энергии является задача минимизации потерь на элементах. При разработке источника питания не достаточно произвести подбор конкретного элемента по общим электрическим характеристикам. Принимая во внимание специфику источников питания с высокочастотным преобразованием, необходимо учитывать особенности их схемотехники в целом и каждого элемента в отдельности.

Цель статьи – разработка принципа оценки потерь главным образом на трансформаторе а также на токоведущих элементах источников питания, сделанных на основе ИС семейства TOPSwitch.

Оценка потерь в преобразователе

Для оценки эффективности трансформатора необходимо определить величину потерь на всех элементах схемы преобразователя с целью определения доли потерь на трансформаторе. Общий КПД преобразователя определяется, исходя из потерь в интеллектуальном ключе, импульсном трансформаторе (с учётом потерь в демпфере), и низковольтной части преобразователя.

Определим потери в трансформаторе. Для расчёта потерь на вихревые токи необходимо определить значения постоянной и переменной составляющих выходного тока, уточнив предварительно время обратного хода [2].

Время обратного хода

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

Длительность импульса обратного хода

$$D_2 = \frac{t_{OFF}}{f}.$$

Значения токов переменной и постоянной составляющих соответственно:

$$I_{DC} = I_2 \frac{D_2}{2},$$

$$I_{AC} = I_2 \sqrt{\frac{D_2}{3} - \frac{D_2^2}{4}}.$$

Сопротивление постоянной и переменной составляющих вторичной обмотки может быть определено графически на основании семейства кривых Дауэлла (рис. 1), приведенные в рекомендациях для расчётов [6].

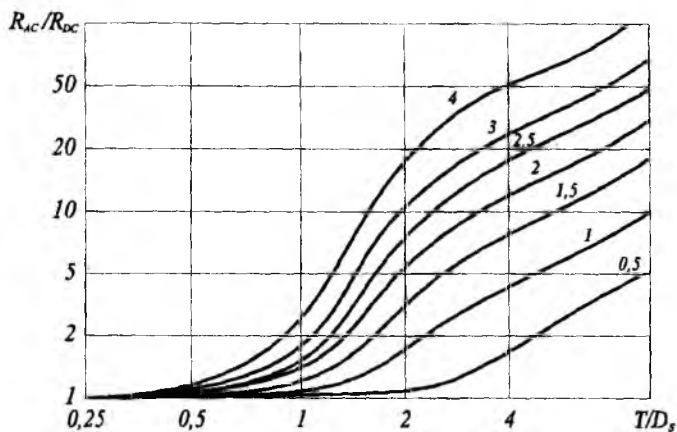


Рис.1. Отношение сопротивления обмотки переменному току к сопротивлению обмотки постоянному току

Данный график позволяет определять отношение сопротивления обмотки переменному току к сопротивлению обмотки постоянному току при разном количестве слоёв обмотки. На нём параметр T – толщина слоя обмотки трансформатора, а D_s – глубина скин-слоя.

Если глубина скин-слоя превышает половину диаметра проводника, то это приводит к появлению так называемого «холостого слоя» – внутреннему слою в сечении проводника, плотность тока в котором значительно меньше, чем на поверхности. При достаточно большом диаметре проводника эффективность использования сечения проводника снижается.

Глубина скин-слоя определяется, исходя из частоты [7]:

$$D_s = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \times \sigma}},$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, σ – удельная проводимость меди.

Если обмотка трансформатора наматывается медным проводником, то данную формулу можно упростить:

$$D_s = \frac{7,5}{\sqrt{f}}.$$

Для определения сопротивления постоянному току необходимо вычислить длину проводника обмотки, приходящуюся на один виток. В зависимости от диаметра проводника, которым наматывается обмотка, сопротивление определяется по формуле

$$R_{DC} = \rho \frac{4 \cdot l_{\text{ВИТ}} \cdot N}{\pi \cdot d^2},$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника, $l_{\text{ВИТ}}$ – длина одного витка, N – количество витков в обмотке, d – диаметр проводника.

При известных значениях сопротивления обмотки переменному току заданной частоты (в данном случае – частоты преобразования) и сопротивления постоянному току R_{AC} и R_{DC} , токов переменной и постоянной составляющей можно определить суммарную рассеиваемую мощность:

$$P_{\Sigma} = P_{DC} + P_{AC} = I_{DC}^2 \times R_{DC} + I_{AC}^2 \times R_{AC}.$$

Потери в материале сердечника трансформатора определяются исходя из известной частоты преобразования, а также величины размаха индукции магнитного поля за одно переключение. Производители EPCOS предлагают рассчитывать потери в сердечнике, исходя из специальных эмпирических графиков, приведенных индивидуально для каждого материала [4]. Эти графики позволяют оценить коэффициент потерь в материале сердечника при известных значениях размаха индукции и частоты (рис. 2).

Соответственно, потери мощности определяются [5]:

$$P_C = P_V \cdot V_E,$$

где P_V – коэффициент потерь, V_E – объём сердечника.

При известных величинах сопротивления открытого канала встроенного в ИС транзистора, тока первичной обмотки, времени прямого хода (в общем случае для γ , равного 0,5) и длительности фронтов можно определить потери в ИС.

Потери в транзисторе складываются из двух составляющих: потерь при переключении и потерь, вызванных конечным сопротивлением открытого канала. Питание микросхем серий TOPSwitch и TOPSwitch-II осуществляется путём трансформатора, поэтому потребляемая внутренними схемами мощность также причисляется к мощности потерь.

Потери, вызываемые падением напряжения на открытом канале, могут быть определены следующим образом:

$$P_{OC} = I_1^2 \cdot R_{ON} \cdot \gamma,$$

где I_1 – среднеквадратичное значение тока первичной обмотки, R_{ON} – сопротивление открытого канала встроенного в ИС транзистора.

Потери при переключении могут быть определены аналогично, при этом ток определяется, как интеграл от функции, которой могут быть описаны формы переднего и заднего фронтов:

$$P_{ON} = \left(\int_0^{\tau_{FON}} I_{ON}(t) dt \right)^2 \cdot R_{ON} \text{ и } P_{OFF} = \left(\int_0^{\tau_{FOFF}} I_{OFF}(t) dt \right)^2 \cdot R_{ON},$$

где τ_{FON} – длительность переднего фронта, $I_{ON}(t)$ – функция нарастания импульса, τ_{FOFF} – длительность заднего фронта, $I_{OFF}(t)$ – функция спада импульса.

Стоит отметить, что в данном случае сопротивление открытого канала R_{ON} является общим для всех выражений, так, как напряжение импульса значительно превышает минимальное напряжение насыщения U_{DSS} .

Для оценки потерь в демпфере (в данном случае рассматривается схема со встречно включенными сапрессором и диодом) может быть использована следующая формула [4]:

$$P_{TVS} = \frac{I_1^2 \cdot L_1^* \cdot f}{2 \cdot (V_{CL} - V_{SD})} \cdot V_{CL},$$

где V_{CL} – минимальное напряжение индуктивного выброса (в общем случае при $\gamma=0,5$, V_{CL} принимается равным минимальному входному напряжению), V_{SD} – напряжение стабилизации сапрессора, L_1^* – индуктивность выброса.

Потери в низковольтной части преобразователя определяются потерями в выпрямителе и в фильтрующих элементах. Их размерность, как правило, больше размерности потерь в высоковольтной части преобразователя, так как в низковольтной части текут значительные токи. Поскольку потери в фильтрующих элементах ничтожно малы (составляют несколько единиц mW), то ими можно пренебречь [4]. Для оценки мощности, выделяемой на конкретном выпрямителе, производители рекомендуют использовать специальные графики.

Типовой график зависимости потерь на выпрямительном диоде в зависимости от прямого тока и коэффициента заполнения импульсов приведен на рис. 3. на примере ультрабыстрого диода STPS1045 [9].

Пример расчёта

Пусть требуется рассчитать эффективность импульсного трансформатора, рассчитанного по методике [11]. Входное напряжение – напряжение промышленной сети 220 В. Выходное

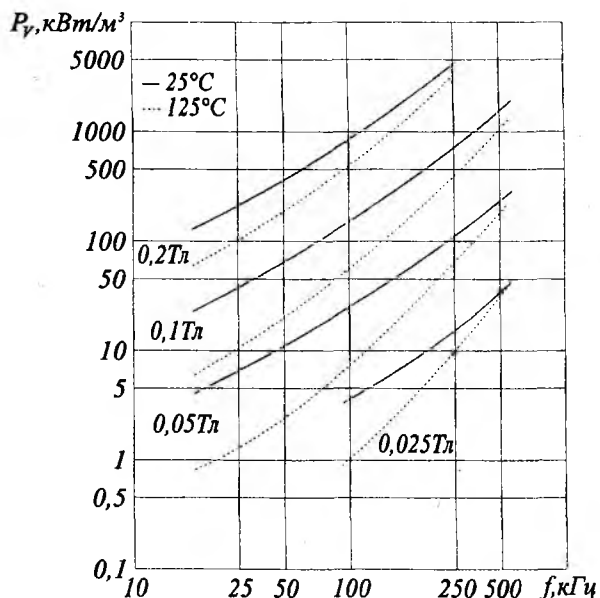


Рис. 2. Зависимость коэффициента потерь от частоты при различных значениях размаха индукции магнитного поля для материала №87

напряжение 12 В и выходной ток 3,33 А. Преобразователь работает на полной частоте 132 кГц. Обмотки наматываются медными проводами. Плотность тока в меди j равна 10 А/мм². В качестве сердечника был выбран сердечник ETD29 [12], индуктивность первичной обмотки 827 мкГн, индуктивность вторичной обмотки 12 мкГн, количество витков первичной обмотки – 41, количество витков вторичной обмотки – 5, количество витков обмотки смещения – 4.

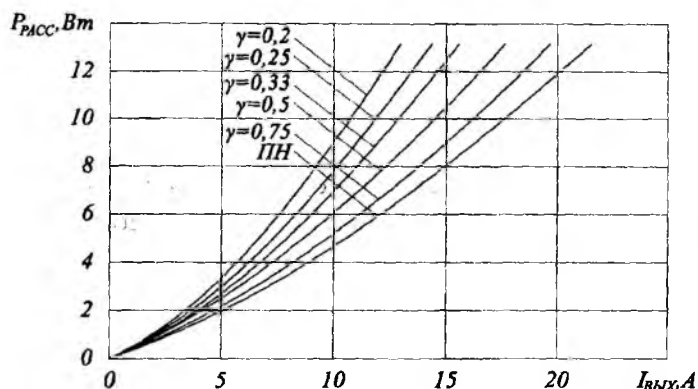


Рис. 3. Кривые зависимости рассеиваемой мощности от величины тока при разных длительностях импульсов и постоянного напряжения для диода STPS1045

Определим среднеквадратичное значение тока первичной обмотки:

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

Рассчитаем среднюю длину витка первичной обмотки, задавшись диаметром катушки:

$$l_{C1} = d_{C1} \cdot \pi \approx 37,7(\text{мм}).$$

Рассчитаем сопротивление обмотки:

$$R_1 = R_{НОМ} \cdot l_{C1} \cdot N_1 = 0,6(\text{Ом}).$$

Определим потери в первичной обмотке:

$$P_1' = (I_1')^2 \cdot R_1 = 0,1(\text{Вт}).$$

Определим ток вторичной обмотки:

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

Определим среднеквадратичное значение тока вторичной обмотки:

$$I_2' = I_2 \sqrt{\frac{\gamma}{3}} = 3,1(\text{А}).$$

Определим длину витка вторичной обмотки:

$$l_{C2} = d_{C2} \cdot \pi \approx 56,5(\text{мм}).$$

Рассчитаем сопротивление обмотки с учётом того, что обмотка бифилярная:

$$R_{DC} = \frac{R_{НОМ} \cdot l_{C2} \cdot N_2}{2} = 0,2(\text{Ом}).$$

Определим значения токов переменной и постоянной составляющих:

$$I_{DC} = I_2 \frac{\gamma}{2} = 1,9(\text{А}), \quad I_{AC} = I_2 \sqrt{\frac{D_2}{3} - \frac{D_2^2}{4}} = 2,2(\text{А}).$$

Определим потери по постоянному току во вторичной обмотке:

$$P_2' = (I_{DC})^2 \cdot R_{DC} = 0,6(\text{Вт}).$$

Согласно графику (рис. 1) для однослойной намотки и при условии совпадения диаметра жилы с двойной глубиной скин-слоя, отношение R_{AC} / R_{DC} равно 1,04, следовательно, потери сопротивление обмотки переменному току:

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 максимальный ток первичной обмотки:

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

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot 1,04 = 0,2(\text{Ом}).$$

Определим потери по переменному току во вторичной обмотке:

$$P_2' = (I_{AC})^2 \cdot R_{AC} = 0,8(\text{Вт}).$$

Суммарные потери во вторичной обмотке:

$$P_{\Sigma} = P_2' + P_2'' = 1,4(\text{Вт}).$$

Определим размах индукции за время закачки энергии в сердечник:

$$\Delta B = \frac{V_{IMIN} \cdot t_{ON}}{S_c \cdot N_1} = 243(\text{мТл}).$$

Согласно графикам зависимости потерь в феррите от частоты переключения и размаха индукции (рис. 2) потери в феррите составляют 160 мВт/см^3 . Объем сердечника составляет $5,35 \text{ см}^3$, таким образом потери в сердечнике составляют:

$$P_C = P_V \cdot V_E = 0,9(\text{Вт}).$$

Таким образом, потери в трансформаторе составляют:

$$P_{TP} = P_1' + P_2' + P_2'' + P_C = 3(\text{Вт}).$$

Определим общий КПД источника питания при условии, что в качестве демпфера используются встречно включенные диод BYV26С и сапрессор Р6КЕ200А [10].

Потери, вызываемые падением напряжения на открытом канале (для худшего случая, когда температура кристалла ИС составляет 125°C):

$$P_{OC} = I_1^2 \cdot R_{ON} \cdot \gamma = 716(\text{мВт}).$$

Потери при переключении:

$$P_{ON} = \left(\int_0^{\tau_{FON}} I_{ON}(t) dt \right)^2 \cdot R_{ON} = 51(\text{мВт}), \quad P_{OFF} = \left(\int_0^{\tau_{FOFF}} I_{OFF}(t) dt \right)^2 \cdot R_{ON} = 67(\text{мВт}).$$

Таким образом, суммарные потери в ИС:

$$P_{IC} = P_{OC} + P_{ON} + P_{OFF} + P_C = 1,2(\text{Вт}).$$

Потери в демпфере

$$P_{TVS} = \frac{I_1^2 \cdot L_1 \cdot f}{2 \cdot (V_{CL} - V_{SD})} \cdot V_{CL} = 992(\text{мВт}).$$

Потери на выпрямителе определяются согласно графикам зависимости от тока, и при оптимальной длительности обратного хода ключа составляют $1,8 \text{ Вт}$.

Полная мощность источника питания:

$$P_{ПОЛН} = P_{ВЫХ} + P_{ИС} + P_{TP} + P_{TVS} + P_{ВЫПР} = 46,9(\text{Вт}).$$

КПД источника питания:

$$\eta_{ИП} = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ПОЛН}} \cdot 100\% = 85\%.$$

КПД трансформатора:

$$\eta_{TP} = \frac{P_{ПОЛН} - P_{TP}}{P_{ПОЛН}} = 94\%.$$

Выводы

Выполнен анализ и приведен принцип оценки потерь в трансформаторе и токоведущих элементах в сетевых преобразователях напряжения на ИС TOPSwitch.

Установлено, что на КПД трансформатора и КПД устройства в целом в большей степени влияют потери во вторичной обмотке трансформатора вследствие того, что в ней текут значительные токи. Имеющийся опыт работы показал, что при изготовлении трансформаторов (особенно для больших выходных токов) в качестве провода вторичной обмотки целесообразно использовать не лиценднат, 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.

Список литературы: 1. Б. Ю. Семёнов. 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 Integrations, 2008, 48p. 4. *Supply Efficiency.* Power Integrations, 2001, 20p. 5. *Ferrites and accessories. Materials.* EPCOS AG. 2006, 77p. 6. *Lloyd H. Dixon Jr. Wddy current losses in transformer. Winding and circuit wiring.* Texas Instruments. 2003, 13p. 7. Зоммерфельд А. Электродинамика / Пер. с нем. С. А. Элькинда. М.: Изд-во иностр. лит-ры. 1958. 505с. 8. TOPSwitch-II flyback quick selection curves. Power Integrations, 1998, 8p. 9. STPS1045D/F/FP Power schottky rectifier. ST-Microelectronics. 2003, 6p. 10. P6KE6.8 thru P6KE440A. Micro commercial components, 2000. 6 p. 11. Сергеев П. Ю. Принципы конструирования трансформаторов для сетевых обратноточковых преобразователей на ИС TOPSwitch // Радиотехника. 2008. Вып. 154. С. 88-93. 12. ETD 29/16/10. Core and accessories. EPCOS AG. 2006, 7p.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 26.12.2008