

## ПРИНЦИП ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

*Наведені аналітичні оцінки втрат потужності на основних струмопровідних елементах перетворювачів електричної енергії. Результати досліджень представлені у вигляді графічних залежностей від струму, частоти і тривалості імпульсів.*

*Приведены аналитические оценки потерь мощности на основных токоведущих элементах преобразователей электрической энергии. Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей от тока, частоты и длительности импульсов.*

В процессе работы преобразователей источников питания и преобразователей электрической энергии значительные потери мощности происходят на токоведущих элементах: ключевых и выпрямительных полупроводниковых элементах, трансформаторах и дросселях, а также в цепях снабберов и демпферов.

Потери в транзисторах возникают вследствие ненулевого сопротивления открытого канала полевых транзисторов [1], либо вследствие ненулевого падения напряжения на канале коллектор-эмиттер БТИЗ транзисторов [2].

Потери в транзисторе складываются из двух составляющих: потерь при переключении и потерь, вызванных конечным сопротивлением открытого канала.

Потери при переключении могут быть определены [9]:

$$P_{SW} = C_{OSS} \cdot V_{BUS} \cdot f + I_D \cdot V_{DIS} \cdot f \cdot t_F, \quad (1)$$

где  $I_D$  – коммутлируемый ток,  $C_{OSS}$  – выходная ёмкость транзистора,  $V_{BUS}$  – коммутлируемое напряжение,  $f$  – частота переключения,  $V_{DIS}$  – падение напряжения на обратном диоде,  $t_F$  – полное время выключения транзистора.

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

$$P_{OC} = I_D^2 \cdot R_{ON} \cdot \gamma, \quad (2)$$

где  $R_{ON}$  – сопротивление открытого канала транзистора,  $\gamma$  – коэффициент заполнения импульса.

Потери, вызываемые падением напряжения на открытом канале коллектор-эмиттер БТИЗ транзистора, могут быть определены следующим образом:

$$P_{OC} = I_C \cdot U_{CE(ON)} \cdot \gamma, \quad (3)$$

где  $I_C$  – коммутлируемый ток,  $U_{CE(ON)}$  – падение напряжения на открытом канале коллектор-эмиттер.

Мощность потерь в снаббере определяются энергией, запасённой в защитной индуктивности (если она присутствует в схеме), а также в конденсаторе, соответственно в открытом и закрытом состоянии определяется следующим образом [13]:

$$P_{SN} = \frac{L_0 \cdot I_L^2 + C_0 \cdot E^2}{2} \cdot f, \quad (4)$$

где  $E$  – напряжение стока (коллектора),  $L_0$  – индуктивность защитного дросселя,  $I_L$  – коммутлируемый ток,  $C_0$  – ёмкость защитного конденсатора.

Для расчёта потерь на вихревые токи обмоток

трансформатора необходимо определить значения постоянной и переменной составляющих тока:

$$I_{DC} = I \cdot \frac{\gamma}{2}, \quad I_{AC} = I \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{3} - \frac{\gamma^2}{4}}. \quad (5)$$

Сопротивление постоянной и переменной составляющих вторичной обмотки может быть определено графически на основании семейства кривых Дауэлла (рис. 1) приведенных в рекомендациях для расчётов [3].

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.

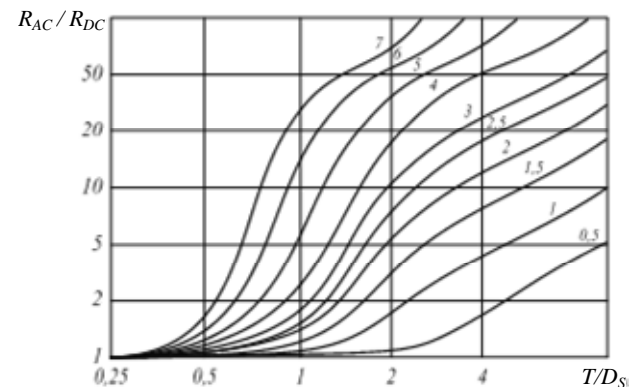


Рис. 1. Отношение сопротивления обмотки переменному току к сопротивлению обмотки постоянному току

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 [4]:

$$D_S = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}, \quad (6)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\sigma$  – удельная проводимость меди.

Если обмотка трансформатора наматывается

медным проводником, то данную формулу можно упростить:

$$D_S = 75/\sqrt{f}. \quad (7)$$

Следует отметить, что в настоящее время для намотки импульсных трансформаторов используют специальные литцендраты следующих типов:

- ЛЭП – провод круглого сечения с жилой, скрученной из медных проволок, изолированных лаком на полиуретановой основе. Температурный индекс 120 °С;
- ЛЭПКО – провод круглого сечения с жилой, скрученной из медных проволок, изолированных лаком на полиуретановой основе, с однослойной обмоткой из капроновых нитей. Температурный индекс 120 °С;
- ЛЭПШД – провод круглого сечения с жилой, скрученной из медных проволок, изолированных лаком на полиуретановой основе, с двухслойной обмоткой из натурального шелка. Температурный индекс 120 °С;
- ЛЭШО – провод круглого сечения с жилой, скрученной из медных проволок, изолированных лаком на полиуретановой основе, с однослойной обмоткой из натурального шелка. Температурный индекс 105 °С.

Как правило, в данных литцендратах диаметр одной жилы составляет 60-100 мкм, что соответствует частотам примерно 4,8-1,8 мГц; таким образом, при выборе проводов достаточно определить количество жил, подобрав требуемое общее сечение по таблицам, приводимым для литцендрата соответствующего типа.

Если обмотка многослойная, то для каждого слоя длина витка определяется индивидуально. При сложной намотке трансформатора для более точного определения длины провода, выполняется эскиз сечения с определением размеров.

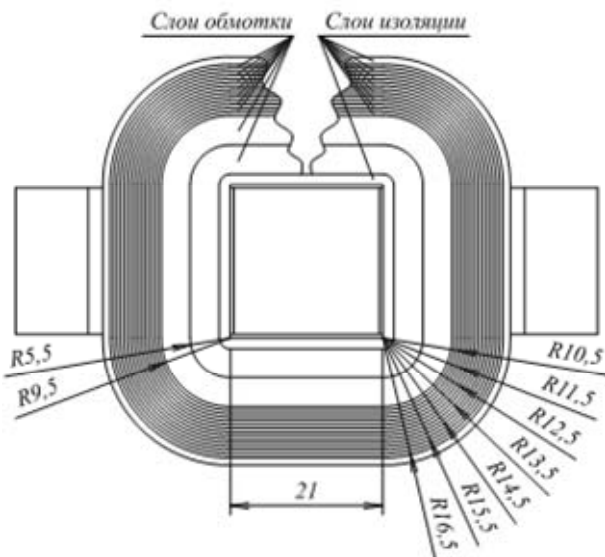


Рис. 2. Поперечное сечение трансформатора

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:

$$P_{\Sigma} = P_{DC} + P_{AC} = I_{DC}^2 \cdot R_{DC} + I_{AC}^2 \cdot R_{AC}, \quad (8)$$

где  $I$  – действующее значение тока в обмотке транс-

форматора.

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 [5]. Эти графики позволяют оценить коэффициент потерь в материале сердечника при известных значениях размаха индукции и частоты (рис. 3). Соответственно, потери мощности определяются [6]:

$$P_C = P_V \cdot V_E, \quad (9)$$

где  $P_V$  – коэффициент потерь,  $V_E$  – объем сердечника.

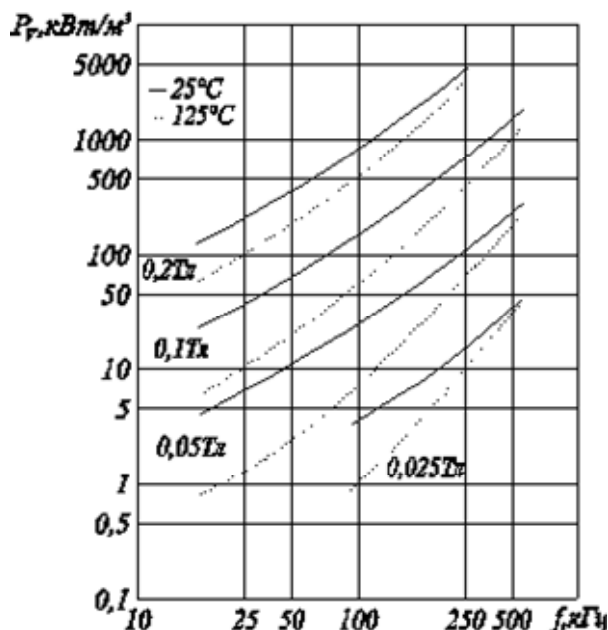


Рис. 3. Зависимость коэффициента потерь от частоты при различных значениях размаха индукции магнитного поля для материала № 87

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. 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. 4 на примере ультрабыстрого диодного модуля UFB200FA20 [9].

При работе однотактного преобразователя, где в качестве выпрямителя используются два диода – прямой и замыкающий, потери на замыкающем диоде составляют 71 % от потерь на прямом диоде [14].

Потери в дросселе определяются аналогично потерям в обмотках трансформатора. Для определения размаха индукции в материале сердечника, на котором изготовлен дроссель, может быть использована следующая формула [15]:

$$\Delta B = \frac{V_{O(\text{МАКС})} \cdot 10^4}{4 \cdot f \cdot S_C \cdot K_C \cdot N}, \quad (10)$$

где  $V_{O(\text{МАКС})}$  – максимальное выходное напряжение,  $S_C$  – площадь сечения сердечника,  $K_C$  – коэффициент заполнения сердечника (0,6-0,9),  $N$  – количество витков.

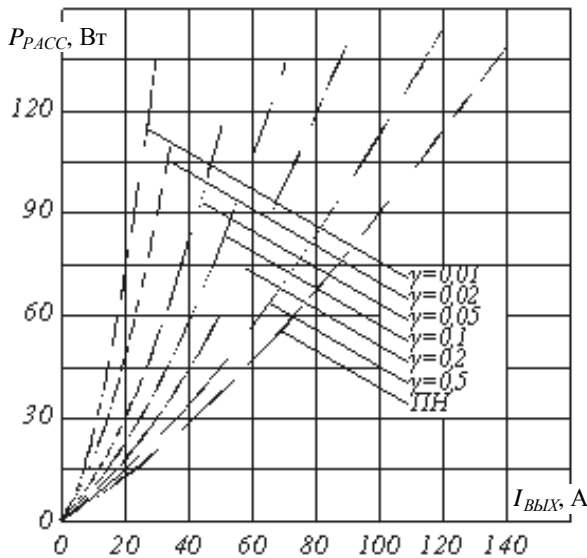


Рис. 4. Кривые зависимости рассеиваемой мощности от величины тока при разных длительностях импульсов и постоянного напряжения для диода UFB200FA20

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A More Realistic Characterization of Power MOSFET Output Capacitance Coss. International Rectifier. – 2004.
2. Carl Blake and Chris Bull. IGBT or MOSFET: Choose Wisely. International Rectifier. – 2004. – 5 p.
3. Lloyd H., Dixon Jr. Eddy current losses in transformer. Winding and circuit wiring. Texas Instruments. – 2003. – 13 p.
4. Зоммерфельд А. Электродинамика / Пер. с нем. С.А. Элькинда. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958. – 505 с.
5. Ferrites and accessories. Materials. EPCOS AG. – 2006. – 77 p.

6. Б.Ю. Семёнов. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
7. Switchmode power supplies. Reference manual and design guide. ON semiconductor. – 2000. – 65 p.
8. Supply Efficiency. Power Intergations. – 2001. – 20 p.
9. Class D Audio Amplifier Basics. International Rectifier. – 2006. – 14 p.
10. Кузнецов А. Трансформаторы и дроссели для импульсных источников питания / Схемотехника. – 2000. – № 3. – С. 2-4.
11. Ф. Чаки, И. Герман, И. Ипшич и др. Силовая электроника: примеры и расчеты. Пер. с англ. – М.: Энергоатом-издат, 1982. – 384 с.
12. UFB200FA20 Insulated Ultrafast Rectifier Module. International Rectifier. – 2006. – 6 p.
13. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Додэка, 2005. – 384 с.
14. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование. Пер. с англ. – К.: МК-Пресс, 2007. – 288 с.
15. В.Я.Володин. Современные сварочные аппараты своими руками. – СПб.: Наука и техника, 2008. – 304 с.

Поступила 19.04.2010

*Сергеев Павел Юрьевич*

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
кафедра "Микроэлектроника, электронные приборы  
и устройства"

61166, Харьков, пр. Ленина, 14, к. 212

тел.:7021362 (раб.), 7011949 (дом.)

e-mail: sergeyev792@yandex.ru

*P.J. Sergeev*

**Principle of estimation of efficiency transformers of electric energy of high power.**

Analytical estimations over losses of power are brought on the basic conducting current elements transformers of electric energy. The results of researches are presented as graphic dependences on a current, frequency and duration of impulses.

**Key words – conducting current elements, transformers, electric energy.**