

# Методика и программа расчета импульсного трансформатора двухтактного преобразователя

Е. МОСКАТОВ, г. Таганрог Ростовской обл.

**В этой статье автор предлагает уточненную методику расчета импульсного трансформатора на кольцевом магнитопроводе и соответствующую ей программу, которая обеспечивает хорошее совпадение расчетных и измеренных параметров изготовленных трансформаторов.**

Один из основных элементов импульсного источника питания (ИИП) — импульсный трансформатор. От точности его расчета и качества изготовления зависят важнейшие параметры ИИП: КПД, масса, габариты, надежность. Как показано в статье [1], расчет по методике, изложенной в [2], может дать неверный результат. Усовершенствованная методика, описанная в [1], может быть улучшена и дополнена на основе теории и практики изготовления ИИП с двухтактными преобразователями.

В расчетах по методикам [1, 2] КПД трансформатора принят равным 80%. Обычно в преобразователе ИИП мощностью от 100 до 500 Вт в диапазоне частот от 10 до 100 кГц КПД трансформатора примерно равен 95...99%, а общий КПД всего источника — более 80%. Неоснованно заниженный КПД уменьшает расчетное значение габаритной мощности трансформатора, повышает используемую мощность и прямую составляющую тока коммутирующих транзисторов, что может привести к нерациональному выбору последних. Расчет становится более точным, если определять КПД трансформатора по усредненной зависимости от суммарной мощности нагрузки и частоты [3, с. 115], показанной на рис. 1. Эти кривые построены по экспериментальным данным для магнетитовых никель-цинковых и марганец-цинковых ферритовых магнитопроводов различной марки и конфигурации.

Всегда желательно уточнить справочные данные выбранного магнитопровода: измерить его габариты и магнитную проницаемость  $\mu$ . Последний параметр можно определить экспериментально [4, с. 581, 582]. Для этого равномерно по всей длине кольца наматывают пробную обмотку из  $n$  витков. Затем измеряют ее индуктивность и вычисляют магнитную проницаемость по формуле

$$\mu = (2500L \cdot (D+d)) / (n^2 \cdot h \cdot (D-d)),$$

где  $L$  — измеренная индуктивность обмотки, мкГн;  $D$ ,  $d$  и  $h$  — размеры магнитопровода, мм (внешний, внутренний диаметры и высота). Из измеренной индуктивности желательно вычесть индуктивность соединительных проводников.

В резонансных и квазирезонансных ИИП форма импульсов тока, протекающих через обмотки трансформаторов, колоколообразная. В таких ИИП элементы преобразователя подвергаются четырех-пятикратным перегрузкам по

току. Это следует помнить как при выборе коммутирующих транзисторов, так и при проведении расчетов. Следует заметить, что ни по методикам из [1, 2], ни по предлагаемой методике резонансные и квазирезонансные ИИП рассчитывать не следует.

Учитывая сказанное выше, основываясь на [1; 2] и дополняя [3, 5—7], предлагаю методику расчета импульсного трансформатора двухтактного преобразователя с выходной мощностью от 25 Вт до 5 кВт и частотой преобразования от 4 до 500 кГц на кольцевом магнитопроводе.

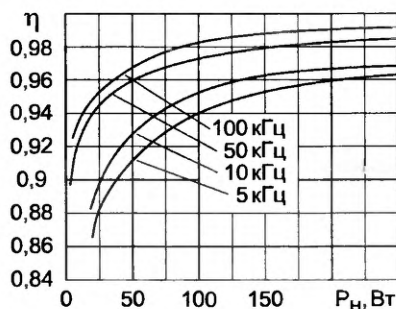


Рис. 1

## Исходные данные для расчета:

—  $U_{пит\ мин}$ ,  $U_{пит\ ном}$ ,  $U_{пит\ макс}$  — соответственно минимальное, номинальное и максимальное напряжение питания преобразователя;

—  $U_{кз,нас}$  — напряжение насыщения участка коллектор—эмиттер (или сток—исток) коммутирующих транзисторов;

—  $V_{нас}$  — индукция насыщения магнитопровода;

—  $\mu_{эфф}$  — эффективная магнитная проницаемость магнитопровода;

—  $F$  — частота преобразования;

—  $U_n$  — напряжение на нагрузке;

—  $I_n$  — ток, потребляемый нагрузкой;

—  $D$ ,  $d$ ,  $h$  — внешний диаметр, внутренний диаметр и высота кольцевого магнитопровода.

## Методика расчета:

1. Мощность, потребляемая нагрузкой,  $P_n = I_n \cdot U_n$ . Если нагрузок несколько, вычисляют суммарную потребляемую ими мощность.

2. Вычисляют КПД трансформатора согласно рис. 1 по эмпирической формуле  $\eta = 0,99 - (0,175/F) - (1 + (9,95/F^{1,3})) / P_n$ , (1) где значение  $F$  — кГц,  $P_n$  — Вт.

3. Используемая мощность трансформатора  $P_{исп} = P_n / \eta$ .

4. Площадь сечения магнитопровода  $S_c = (D-d) \cdot h / 2$ .

5. Площадь окна магнитопровода  $S_o = \pi d^2 / 4$ .

6. Средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе

$$l_{ср,л} = \pi(D+d) / 2.$$

7. Принимаем значение максимальной индукции  $B_m$  (Тл) частной петли гистерезиса в пределах  $B_m = (0,5...0,75)B_{нас}$ . Из [3] известно, что выбирать  $B_m$  меньше  $0,5B_{нас}$  нерационально вследствие необоснованного увеличения габаритов трансформатора, а больше  $0,75B_{нас}$  нельзя из-за повышения вероятности насыщения магнитопровода. Принимаем  $B_m$  равным среднему значению —  $0,625B_{нас}$ .

8. Габаритную мощность трансформатора в общем случае рассчитываем по формуле [3, с. 85]; [5, с. 24—26]; [7, с. 109]:

$$P_{габ} = 0,02S_c \cdot S_o \cdot F \cdot B_m \cdot \eta \cdot J \cdot s \cdot k_c \cdot k_m \cdot k_f, \quad (2)$$

где значение  $P_{габ}$  — Вт;  $S_c$  и  $S_o$  — см<sup>2</sup>;  $F$  — Гц;  $B_m$  — Тл;  $J$  — плотность тока в обмотках, А/мм<sup>2</sup>;  $s$  — число стержней магнитопровода, на которых расположены обмотки (для кольцевого магнитопровода — 1);  $k_c$  — коэффициент заполнения ферромагнитным материалом площади поперечного сечения магнитопровода [5, с. 24];  $k_m$  — коэффициент заполнения окна медью обмоток;  $k_f$  — коэффициент формы преобразовываемого напряжения (для прямоугольной формы — 1).

Из [7, с. 110] коэффициент  $k_c$  для ферритов — 1;  $k_m$  — 0,15 при  $P_n > 15$  Вт.

9. Согласно [7, с. 109] и проверено автором экспериментально

$$J = 1,5 + (24/\sqrt{P_{габ}}). \quad (3)$$

Поскольку  $P_{габ}$  в свою очередь зависит от  $J$ , вычисление следует выполнять итерационно. Трудностей итерационного расчета можно избежать, приняв  $J$  равной 1,87 А/мм<sup>2</sup> или вычислив  $P_{габ}$  по формуле, приведенной в статье [2], которая дает менее точный, но пригодный для первоначальной оценки результат:

$$P_{габ} = S_c \cdot S_o \cdot F \cdot B_m / 150,$$

где значение  $P_{габ}$  — Вт;  $S_c$  и  $S_o$  — см<sup>2</sup>;  $F$  — Гц;  $B_m$  — Тл.

10. Проверим, если  $P_{габ} > 1,2P_{исп}$ , выбранный кольцевой магнитопровод можно использовать, то продолжаем расчет. Если неравенство не выполняется, желательно либо повысить частоту преобразования (если это позволяют характеристики материала магнитопровода и элементы ИИП), либо применить магнитопровод больших размеров. Запас по  $P_{габ}$  учитывает изменение параметров магнитопровода (старение, уменьшение  $\mu_{эфф}$  при нагревании и т. д.).

11. Наибольшее напряжение первичной обмотки трансформатора для полумостового преобразователя  $U_1 = U_{пит\ макс} / 2 - 2U_{кз,нас}$ ; для мостового преобразователя  $U_1 = U_{пит\ макс} - 2U_{кз,нас}$ ; для преобразователя со средней точкой  $U_1 = 2U_{пит\ макс} - U_{кз,нас}$ .

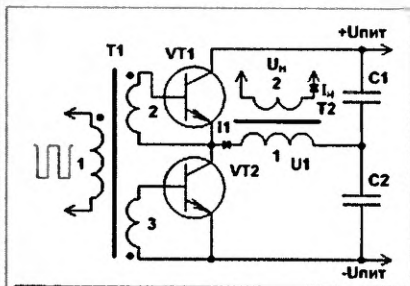
12. Определяем число витков первичной обмотки трансформатора [3, с. 92]:

$$w_1 = U_1 / (4F \cdot B_m \cdot S_c \cdot k_c \cdot k_f),$$

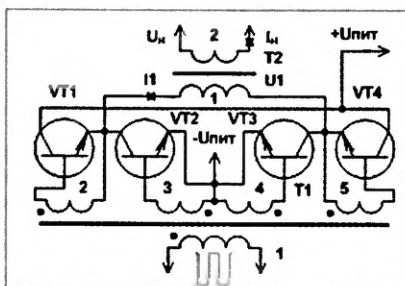
где значение  $U_1$  — В;  $F$  — Гц;  $B_m$  — Тл;  $S_c$  — м<sup>2</sup>.



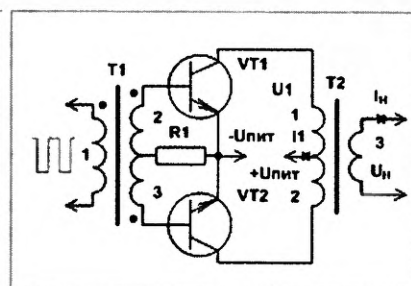
Расчёт трансформатора  Выход  Справка



Расчёт трансформатора полумостового преобразователя с задающим генератором



Расчёт трансформатора мостового преобразователя с задающим генератором



Расчёт трансформатора с отводом от середины, преобразователь с задающим генератором

Расчёт трансформатора двухтактного импульсного источника питания

Рис. 2

Расчёт трансформатора с отводом от середины, преобразователь с ЗГ

Расчитать! Для тороидальных магнитопроводов Очистка данных Пример Закрыть

Исходные данные

Напряжение питания преобразователя (мин., ном., макс.), В	264	310	357		
Напряжение U <sub>кз.нас</sub> транзисторов, В	0,8				
Индукция насыщения магнитопровода B <sub>нас</sub> , Тл	0,38				
Эффективная магнитная проницаемость магнитопровода μэф	1839				
Частота преобразования F, кГц	70				
Напряжения вторичных обмоток, В	15	50	0	0	0
Токи вторичных обмоток, А	0,05	3	0	0	0
Размеры магнитопровода, мм	38	24	7		

Результаты расчёта

Потребляемая нагрузкой мощность P <sub>н</sub> , Вт	150,8	
Используемая мощность трансформатора P <sub>исп</sub> , Вт	153,7	
Габаритная мощность трансформатора P <sub>габ</sub> , Вт	311	
КПД трансформатора, %	98,1	
Напряжение на первичной обмотке T2 U <sub>1</sub> , В	713,2	
Максимальный полный ток первичной обмотки T2 I <sub>1max</sub> , А	0,65	
Прямоугольная составляющая тока первичной обмотки T2 I <sub>1п</sub> , А	0,58	
Треугольная составляющая тока первичной обмотки T2 I <sub>1т</sub> , А	0,09	
Число витков первичной обмотки T2 w <sub>1</sub>	219	
Индуктивность первичной обмотки T2 L <sub>1</sub> , мГн	55,765	
Диаметр провода первичной обмотки T2 d <sub>1-1</sub> , мм	0,48	
Числа витков вторичных обмоток T2 w <sub>2</sub>	5	15
Диаметры проводов вторичных обмоток T2, мм	0,13	1,04
Площадь окна выбранного магнитопровода S <sub>о</sub> , см <sup>2</sup>	4,524	
Площадь сечения выбранного магнитопровода S <sub>с</sub> , см <sup>2</sup>	0,490	
Длина средней линии магнитопровода l <sub>ср.л</sub> , см	9,739	

Расчёт трансформатора с отводом от середины, преобразователь с ЗГ

Рис. 3

13. Рассчитываем индуктивность первичной обмотки трансформатора (в Гн) по известной формуле

$$L_1 = w_1^2 \cdot \mu_{эф} \cdot \mu_0 \cdot S_c / l_{ср.л}$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

14. По методике [1] вычисляем максимальное значение прямоугольной составляющей тока первичной обмотки трансформатора:

$$I_{1\max} = P_{исп} / (U_{пит\min} / 2 - 2U_{кз.нас});$$

$$I_{1\max} = P_{исп} / (U_{пит\min} - 2U_{кз.нас});$$

— для преобразователя со средней точкой

$$I_{1\max} = 2 P_{исп} / (2U_{пит\min} - U_{кз.нас}).$$

15. Максимальное значение амплитуды треугольной составляющей тока [1]

первичной обмотки трансформатора:

— для полумостового и мостового преобразователей

$$I_{1\max} = U_1 / (4F \cdot L_1);$$

— для преобразователя со средней точкой

$$I_{1\max} = U_1 / (2F \cdot L_1),$$

где значение  $I_{1\max} - A$ ;  $U_1 - В$ ,  $F - Гц$ ;  $L_1 - Гн$ .

16. Если выполняется неравенство  $I_{1\max} < 0,2 I_{1\max}$ , полагаем, что форма тока первичной обмотки трансформатора близка к прямоугольной. В противном случае желательно применить магнитопровод с иными параметрами. Но если неравенство не выполнено, продолжают расчет дальше, допуская повышенную амплитуду треугольной составляющей тока, из-за которой придется выбрать коммутирующие транзисторы

с более высоким максимально допустимым током коллектора или стока.

17. Ориентировочно максимальное значение амплитуды тока первичной обмотки  $I_{\Sigma\max} = I_{1\max} + I_{\max}$ . Более точный расчет выполняют в цикле, перебирая значения напряжения питания в интервале его изменения с малым шагом (например, 1 В) и вычисляя соответствующую сумму токов.

18. Диаметр провода первичной обмотки [1]

$$d_1 = 0,6 \sqrt{I_{\Sigma\max}}$$

Если использован литцендрат из N проводов, то согласно [7, с. 111] диаметр обмотки можно рассчитать так:

$$d_1 = 1,13 (I_{\Sigma\max} / (J \cdot N)),$$

где значение  $I_{\Sigma\max} - A$ ;  $d_1 - мм$ ;  $J - A/мм^2$ .

19. Число витков вторичной обмотки  $w_2 = w_1 \cdot U_2 / U_1$ . Диаметр провода вто-

1. Косенко С. Расчет импульсного трансформатора двухтактного преобразователя. — Радио, 2005, № 4, с. 35—37, 44.
2. Жучков В. Расчет трансформатора импульсного блока питания. — Радио, 1987, № 11, с. 43.
3. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г. С. Найвельт, К. Б. Мазель, Ч. И. Хусаминов и др.; под ред. Г. С. Найвельта. — М.: Радио и связь, 1986.
4. Справочник радиолюбителя-конструктора. Издание 2-е, переработанное и дополненное. Составитель: Малинин М. М. — М.: Энергия, 1978.
5. Источники электропитания на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет. / Под ред. Додика С. Д. и Гальперина Е. И. — М.: Советское радио, 1969.
6. Немцов М. В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. Издание 2-е, переработанное и дополненное. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Эрнотсон С. А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. — Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское объединение, 1991.

От редакции. Дистрибутив программы расчета импульсных трансформаторов размещен на сервере редакции по адресу <ftp://ftp.radio.ru/pub/2006/06/Setup\_Transformer\_3000.exe>.

Редактор — М. Евсиков, графика и скриншоты — автора

ричной обмотки  $d_2 = 0,6 \sqrt{I_2}$ . Этот пункт расчета повторяют для каждой вторичной обмотки.

Упрощенный расчет на этом завершён. Для более точного расчета требуется, зная результаты упрощенного, итерационно заново определить КПД трансформатора и плотность тока, учитывая суммарные потери мощности. Точный расчет трансформатора — сложная задача, требующая учета ряда дополнительных параметров. Результаты же будут всего на единицы процентов отличаться от приближенных. Для радиолюбительской практики вполне достаточно упрощенного расчета.

Для экономии времени расчет целесообразно выполнять на компьютере по соответствующей программе, например, по представленной ниже. Программа имеет размер дистрибутива 432 КБ, занимает на жестком диске 1,34 МБ и работоспособна в операционных системах, начиная с Windows 98 SE.

После запуска программы прежде всего определимся со схемой преобразователя. Для этого в основном окне (рис. 2) нажмем на кнопку с изображением соответствующей схемы. В качестве примера выберем схему с импульсным трансформатором с отводом от середины первичной обмотки. После нажатия на кнопку появляется окно, показанное на рис. 3 (без результатов расчета в нижней части окна). Введем исходные данные в верхнюю часть окна.

Из пяти вторичных обмоток, которые может одновременно рассчитать программа, используем две: для питания нагрузки (50 В, 3 А) и для питания задающего генератора (15 В, 50 мА). Последняя строка данных — размеры кольцевого магнитопровода K38×24×7 из феррита 2000НМ-А. После нажатия на кнопку "Рассчитать!" программа выдает результаты расчета — параметры трансформатора. Программа результаты и исходные данные не сохраняет — когда расчет окончен, их надо записать на бумаге или сделать скриншот окна.

Рассчитанный с помощью программы трансформатор был изготовлен, его обмотки изолированы одним слоем тефлоновой ленты. Первой на кольцо намотана обмотка I. Все обмотки намотаны проводом ПЭТВ-2, вместо которого можно использовать МГТФ. Для повышения электропрочности и уменьшения гистерезисности обмотки трансформатора желательно пропитать парафином.

Измеренный КПД трансформатора равен 98,4 % при расчетном 98,1 %. Измеренная индуктивность первичной обмотки — 56,4 мГн, расчетная — 55,8 мГн. Измеренные индуктивности обмоток II (13 мкГн) и III (230 мкГн) также близки к расчетным.

Автором изготовлено более десяти двухтактных ИИП. Все их импульсные трансформаторы, рассчитанные по предложенной программе, имели параметры, близкие к расчетным.

## Экспорт чертежа ACAD в формат BMP

С. КОВАЛЕНКО, г. Кстово

ACAD является одним из программных инструментов для подготовки графической документации. Известно уже много версий этого программного продукта — ACAD-14, ACAD2000 и т. д. Информация в файле ACAD находится в виде графических объектов, которые можно описать математи-

ческими формулами — так называемая векторная графика. Основной формат файлов ACAD — \*.dwg, где \* — имя файла.

Существует много других программных пакетов для подготовки графической документации, которые тоже используют векторную графику, например, CorelDraw или Adobe Illustrator.

К сожалению, форматы файлов разных пакетов отличаются один от другого и поэтому чертеж ACADa можно посмотреть только в ACADe.

Помимо векторной графики, существует еще растровая графика. Картинку растровой графики она описывает не формулами, а состояниями светящихся точек экрана, называемых пикселями. У каждого вида графики есть свои плюсы и минусы. Так, создавать и редактировать чертежи проще, а хранить — компактнее в векторной графике. А вот реальные изображения, например, фотографии или отсканированные документы можно хранить только в виде растровой графики.

Основной формат растровой графики — \*.bmp. Кроме него, есть еще дополнительные, в которых растровая информация подвергается сжатию специальными математическими методами, — \*.jpg, \*.tif, \*.gif, \*.png. Есть и другие графические форматы, число которых сегодня более трехсот.

Для редактирования растровой графики используют программные пакеты Paint, Adobe Photoshop и др. В некоторых книгах Paint назван векторным редактором, однако это относится к профессиональному пакету графического редактирования

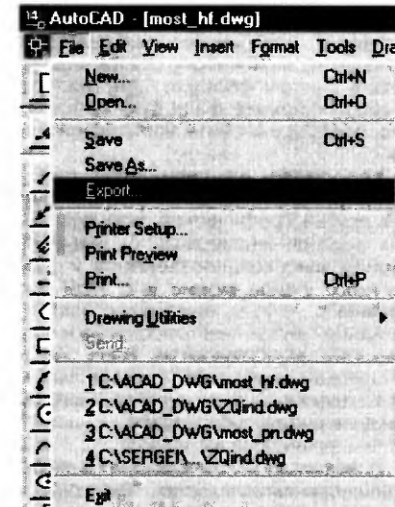


Рис. 1

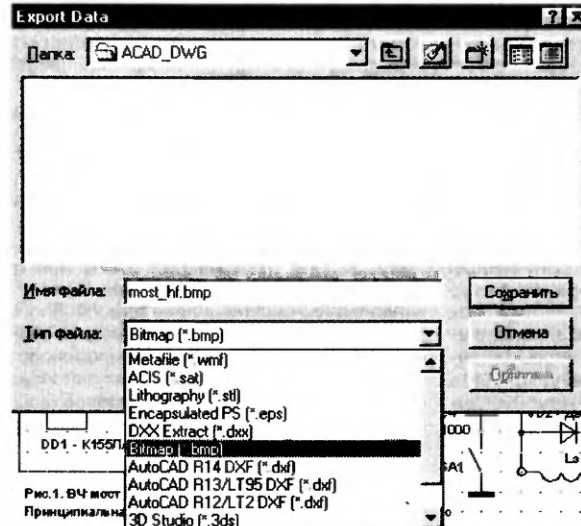


Рис. 2