

## **Выходной трансформатор — почти просто, но не дешево**

Создано: 15.04.2010 19:22 | Обновлено: 14.01.2016 22:21 | Автор: Д.Андронников | Просмотров: 108648

### **Введение**

Вокруг выходных трансформаторов для ламповых усилителей в последние годы создан некий ореол мистики и таинственности, знания, доступного лишь избранным. Отчасти так и есть, однако... Методики инженерного расчета трансформаторов были разработаны более полувека назад и за эти годы претерпели несущественные изменения лишь в части использования новых магнитных материалов более высокого качества [1]. Основные же принципы и расчетные соотношения остались прежними. Законы физики не изменяются за полста лет...

### **Расчёт параметров выходного трансформатора**

усилителя. Ими являются — выходная мощность, приведенное сопротивление нагрузки в цепи анода, индуктивность первичной обмотки и индуктивность рассеяния трансформатора [2].

## Определение необходимых размеров магнитопровода

Первоначально надо определить требуемый габарит магнитопровода. Пригодность имеющегося железа можно ориентировочно оценить по условию:

$$V_c \geq \frac{10}{L_1} \left( \frac{U_A \cdot 10^4}{F_H B_{\max}} \right)^2, \text{ см}^3 \quad (1)$$

где  $V_c$  — активный объем стали;

$$V_c = S \cdot l_c \quad (2)$$

$L_1$  — расчетная индуктивность первичной обмотки, Гн;

$U_A$  — амплитуда напряжения на зажимах первичной обмотки, В;

$F_H$  — нижняя граничная частота, Гц;

$B_{\max}$  — максимальная амплитуда магнитной индукции, Гс.

$S$  — площадь сечения магнитопровода, см<sup>2</sup>;

$l_c$  — средняя длина магнитной силовой линии, см.

Для броневого магнитопровода средняя длина магнитной силовой линии рассчитывается, как:

$$l_c = 2h + 2b + \frac{\pi}{2} y_1 \quad (3)$$

А для стержневого:

$$l_c = 2h + 2b + \pi \cdot y_1 \quad (4)$$

где обозначения соответствуют принятым на Рис. 1.

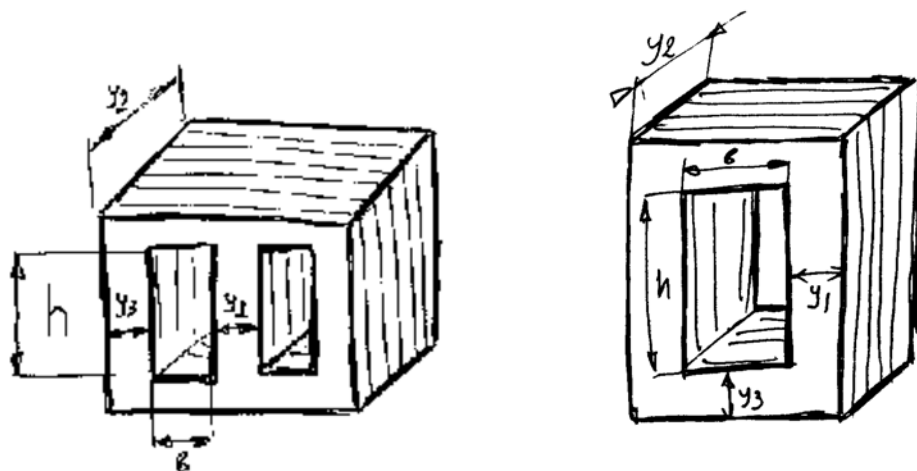


Рис. 1 Основные размеры магнитопроводов

При оценке габаритов магнитопровода величину  $B_{\max}$  следует ориентировочно принять равной 7000 — 8000 Гс для пластинчатых и 10000 Гс для витых разрезных наборов железа.

## Экспериментальное определение индукции трансформатора

Для дальнейших расчетов максимальное значение индукции  $B_{\max}$  желательно определить экспериментально на выбранном железе. С этой целью на каркас трансформатора наматывается пробная обмотка в 100 витков и включается в схему по Рис. 2. Магнитопровод при этом должен быть собран без зазора. Плавное увеличение напряжения на обмотке с помощью ЛАТРа, наблюдают форму тока через нее. В момент появления заметных на глаз искажений формы синусоиды фиксируют напряжение на обмотке (показания прибора V1).



Рис. 2 Схема для измерения максимальной индукции в магнитопроводе

Затем допустимое значение индукции рассчитывают по формуле:

$$B_m \approx \frac{4500 \cdot U_1}{S} \quad (5)$$

где  $U_1$  — показания прибора, В;

$S$  — площадь сечения магнитопровода, см<sup>2</sup> (чистого железа).

## Определение коэффициента трансформации

Расчет конструктивных данных начинают с определения коэффициента трансформации, который, при заданной величине сопротивления нагрузки усилителя, обеспечит расчетную величину анодной нагрузки выходной лампы.

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{R_A}{R_H} \cdot K} \quad (6)$$

где  $n$  — коэффициент трансформации;

$N_1$  — число витков первичной обмотки;

$N_2$  — число витков вторичной обмотки;

$R_A$  — расчетная величина сопротивления анодной нагрузки лампы, Ом;

$R_H$  — сопротивление нагрузки усилителя, Ом;

$K$  — КПД трансформатора.

Величина КПД однотактных трансформаторов на мощности 5 — 30 Вт обычно лежит в пределах 0,8 — 0,9. За значение сопротивления нагрузки усилителя желательно принять величину, равную:

$$R_H = \frac{R_{\text{ном}} + R_{\text{мин}}}{2} \quad (7)$$

где  $R_{\text{ном}}$  — номинальное сопротивление акустической системы;

$R_{\text{мин}}$  — минимальное сопротивление акустической системы в рабочем диапазоне частот.

Такая величина является компромиссной с точки зрения обеспечения как расчетного сопротивления анодной нагрузки лампы в номинальных условиях с одной стороны, так и коэффициента демпфирования с другой.

## Расчёт числа витков первичной обмотки

Число витков первичной обмотки вычисляется из условия не превышения максимально допустимого значения индукции в магнитопроводе:

$$N_1 = \frac{1,5 \cdot 10^7 U_{1M}}{B_{\text{мп}} \cdot F_H \cdot S} \quad (8)$$

где  $U_{1M}$  — максимальная амплитуда напряжения на зажимах первичной обмотки, В;

$B_{\text{мп}}$  — максимально допустимая амплитуда переменной составляющей индукции, Гс.

$$B_{\text{мп}} = B_M / 2 \quad (9)$$

где  $B_M$  — измеренное ранее значение максимальной индукции, Гс.

Опыт расчета и изготовления значительного количества разнообразных трансформаторов (как выходных, так и межкаскадных) позволяет сделать вывод, что значение  $B_{\text{мп}}$  не должно превышать 3500 — 4000 Гс для пластинчатых магнитопроводов (шихтованных) и 5000 Гс для витых разрезных (ленточных). Следует отметить, что витые сердечники, несмотря на более высокие качественные параметры в силовых трансформаторах, несколько уступают пластинчатым для применения в выходных. Искажения сигнала, вносимые трансформатором из-за нелинейности характеристики В/Н при использовании витых магнитопроводов проявляются при меньших значениях индукции, хотя, после появления, нарастают медленнее.

Это явление объясняется тем, что магнитный поток концентрируется во внутренних витках магнитопровода, где длина силовой линии короче. В результате сердечник постепенно насыщается, начиная от внутренних слоев и заканчивая внешними. Внутренние слои оказываются насыщенными гораздо раньше внешних, что проявляется в виде небольшого искривления характеристики намагничивания железа даже при средней индукции 4000 — 6000 Гс. Более высокое качество железа витых сердечников несколько смягчает этот эффект, но полностью устранить не может.

Количество витков первичной обмотки можно определить и по другой формуле, исходя из условия обеспечения расчетной индуктивности:

$$N \approx 8,92 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{L_1 \cdot l_c}{\mu S}} \quad (10)$$

где  $L_1$  требуемая индуктивность обмотки, Гн;

$\mu$  — магнитная проницаемость материала сердечника при заданных ампер-витках постоянного подмагничивания.

Однако, практика показывает, что расчет по формуле (10) приводит к заниженному числу витков по сравнению с (8), а это недопустимо из-за резкого роста искажений на низких частотах вследствие насыщения магнитопровода.

Только при высокой нижней граничной частоте (более 100 — 150 Гц) формула (10) дает большее значение числа витков. Кроме того, она неудобна тем, что в расчет входит величина  $m$ , зависящая от ампер-витков постоянного подмагничивания, определить которую до экспериментального изготовления трансформатора можно лишь приблизительно по графикам соответствующих зависимостей [1], [3], [4].

## Расчёт числа витков вторичной обмотки

Число витков вторичной обмотки рассчитывается как:

$$N_2 = \frac{N_1}{n} \quad (11)$$

## Расчёт диаметра провода

Диаметр провода (чистой меди) первичной обмотки:

$$d_1 = 0,015 \sqrt{\frac{N_1 l_0}{0,5 R_A (1 - N)}}, \text{ мм} \quad (12)$$

$$l_0 \approx 2y_1 + 2y_2 + 8d_K + 2,5 \cdot b \quad (13a)$$

$$l_0 \approx 2y_1 + 2y_2 + 8d_K + 1,1 \cdot b \quad (13b)$$

Формула (13a) справедлива для расчета средней длины витка на броневом сердечнике (Рис. 1a), а формула (13b) — на стречневом (Рис. Ч в), величина  $d_K$  (см) — толщина материала каркаса.

Диаметр провода вторичной обмотки:

$$d_2 = d_1 \sqrt{n} \quad (14)$$

Если вторичная обмотка состоит из нескольких параллельно соединенных секций, то диаметр провода секции рассчитывают как:

$$d_c = \frac{d_2}{\sqrt{k}} \quad (15)$$

## Размещение обмоток трансформатора

После расчета обмотки необходимо проверить их размещение в окне магнитопровода. Наилучшим считается такое размещение, когда и первичная и вторичная обмотки укладываются в целое число слоев и полностью заполняют окно магнитопровода. Для достижения такого результата допустимо варьировать число витков и диаметр провода обмоток в небольших пределах (до  $\pm 10\%$ ).

Заполнение окна магнитопровода можно проверить по формулам:

$$\begin{aligned} A_1 &= (1,2 + 1,4) \cdot (p_1 \cdot d'_1 + (p_1 - 1) \cdot d_{из}) \\ A_2 &= (1,2 + 1,4) \cdot (p_2 \cdot d'_2 + (p_2 - 1) \cdot d_{из}) \quad (16) \\ A_{\Sigma} &= A_1 + A_2 + A_{из} \leq b - d_K \end{aligned}$$

где  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_{из}$  — толщины первичной обмотки, вторичной обмотки и межобмоточной изоляции;

$p_1$ ,  $p_2$  — число слоев первичной и вторичной обмоток;

$d'_1$ ,  $d'_2$  — диаметры проводов с изоляцией первичной и вторичной обмоток;

$d_{из}$  — толщина межслойной изоляции.

Индуктивность рассеяния трансформатора достаточной точностью определяется по формуле;

$$L_s = \frac{0,8 \cdot l_0 \cdot N_1^2 \cdot (A_1 + A_2 + A_{из} \cdot 3)}{10^8 \cdot (k - 1)^2 \cdot 2h'}, \Gamma_H \quad (17)$$

где  $l_0$  — средняя длина витка, см;

$h'$  — высота намотки слоя, см;

$k$  — количество секций.

Для получения расчетной величины индуктивности рассеяния, обмотки трансформатора в большинстве случаев необходимо секционировать. Наиболее просто и эффективно выполнить послойное

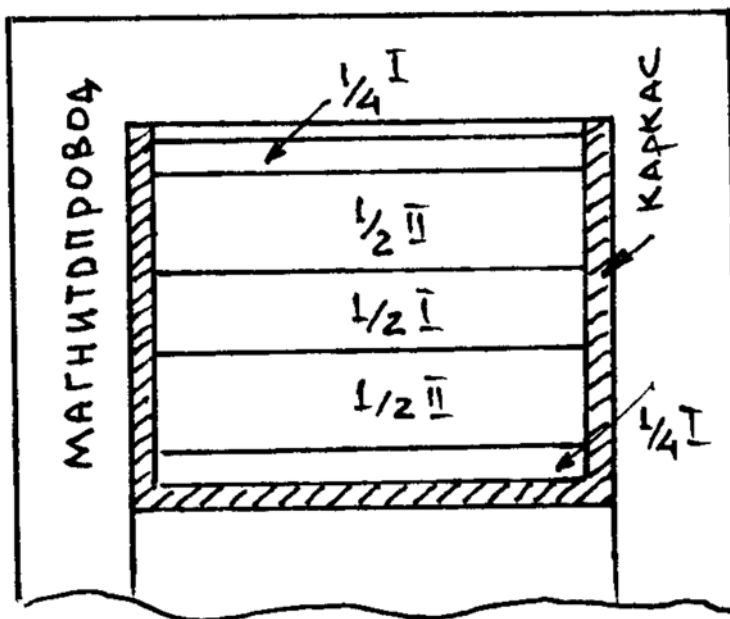


Рис. 3 Пример размещения обмоток в окне магнитопровода (цилиндрическое секционирование)

(цилиндрическое) секционирование, когда обмотки наматываются на каркас частями, а в конце соединяются последовательно или параллельно. Чаще всего применяют последовательное включение секций первичной обмотки и параллельное — вторичной. Суммарное число секций первичной и вторичной  $k$  должно быть таким, чтобы индуктивность рассеяния  $L_s$ , вычисленная по (17), не превышала найденную при электрическом расчете оконечного каскада. Один из вариантов размещения секций на каркасе приведен на Рис. 3. Необходимо помнить, что общее число секций первичной и вторичной обмотки должно быть нечетным, а крайние секции (т.е. непосредственно лежащая на каркасе и внешняя) должны принадлежать одной обмотке и иметь половинное число витков по отношению к внутренним секциям той же обмотки. Только в этом случае выполняется условие компенсации полей рассеяния соседних секций и индуктивность рассеяния будет соответствовать расчетной.

Если обмотка распределена на двух катушках (стержневые трансформаторы), то секции ее должны чередоваться от одной катушки к другой.

Это условие относится и к двухтактным трансформаторам, где обмотки каждого плеча обязательно должны иметь одинаковое число секций на одном и на другом стержнях магнитопровода.

## Определение величины немагнитного зазора

Неотъемлемой конструктивной особенностью трансформатора выходного однотактного каскада является

немагнитный зазор между частями магнитопровода. При его отсутствии постоянная составляющая анодного тока выходной лампы, протекающая через первичную обмотку, вызывает насыщение железа и, как следствие, происходит катастрофическое падение магнитной проницаемости и возрастание искажений, вносимых трансформатором. Зазор не позволяет магнитопроводу войти в насыщение от постоянного подмагничивания (поскольку он эквивалентен многократному увеличению длины магнитной силовой линии для постоянной составляющей магнитного потока) и, в то же время, не влечет за собой драматического снижения величины  $m$ . Оптимальным является такой немагнитный зазор, при котором индукция, соответствующая постоянной составляющей магнитного потока, находилась бы примерно на середине линейной части характеристики намагничивания. Для наиболее распространенных типов электротехнической стали величина зазора может быть ориентировочно определена по формуле:

$$\Delta = 8,75 \cdot 10^{-4} \cdot a \omega_0 l_C, \text{ мм} \quad (18)$$

$$\text{где } a \omega_0 = \frac{\omega_1 \cdot I_0}{l_C} \quad (\omega_1 \text{ соответствует } N_1)$$

$I_0$  — ток постоянного подмагничивания, А;

$l_C$  — длина силовой линии, см.

Более точно величину зазора подгоняют экспериментально при номинальном токе подмагничивания, исходя из условий получения наибольшей выходной мощности на нижней граничной частоте и минимальных искажений при половине номинальной выходной мощности на той же частоте сигнала.

Поскольку теоретический расчет оптимального зазора достаточно сложен и требует значительного количества экспериментальных данных о качестве применяемого железа, то представляется более целесообразным использовать практический подбор зазора в готовом трансформаторе.

## Паразитные ёмкости и методы борьбы с ними

В заключение следует обратить внимание на такие неприятные и неизбежные явления, как межобмоточная и распределенная емкости трансформатора. Совместно с индуктивностями обмоток (или их частями) и индуктивностями рассеяния, они образуют паразитные колебательные контуры, резонирующие в области верхних звуковых и ультразвуковых частот. Эти резонансы искажают частотную и фазовую характеристики трансформатора (набег фазы из-за распределенной емкости плохо сконструированного трансформатора на высших частотах может достигать  $400^\circ$  —  $7000^\circ$  и, кроме того, быть немонотонным). Радикального средства борьбы с этими явлениями нет, но уменьшить их можно следующими способами:

1. Равномерной плотной укладкой (виток к витку) обмоток трансформатора.
2. Использованием межслойной изоляции внутри секций каждой обмотки (бумага 0,05 — 0,1 мм).
3. Увеличение толщины межобмоточной изоляции (что несколько уменьшает коэффициент заполнения окна, зато существенно снижает междуобмоточную емкость).
4. Использование магнитопровода расчетного размера. (Увеличение габаритов трансформатора против необходимого введет к росту указанных емкостей, а увеличение длины витка — к росту  $L_s$ ).
5. Укладка расчетного числа секций (непомерное увлечение секционированием резко увеличивает междуобмоточную емкость).

Пропитка катушки трансформатора различными компаундами имеет как достоинства, так и недостатки. К первым относится увеличение механической прочности и снижение резонансов конструкции. Ко вторым — увеличение паразитных емкостей и снижение частот паразитных электрических резонансов вплоть до звукового диапазона. Решение о пропитке трансформатора должно приниматься только после тщательного анализа всех "за" и "против".

## Заключение

И, наконец, хотелось бы напомнить, что выходной трансформатор — это клубок компромиссов. Не следует гнаться за идеальными параметрами и огромной массой: в 99% случаев улучшение одного параметра ведет к ухудшению нескольких других. Излишнее количество секций увеличивает межобмоточную емкость; излишнее число витков — индуктивность рассеяния и активное сопротивление. Таких примеров множество. При расчете задавайтесь разумными исходными параметрами и не делайте из трансформатора противовеса для башенного крана. Не требуйте от трансформатора невозможного, но разумно используйте то, что он может предоставить.

## Литература

1. Цыкни Г.С. Трансформаторы низкой частоты. М., Связьиздат, 1955.
2. Андронников Д.В. "Три электрода в один такт". "Вестник А.Р.А." No. 3, 1998 г.
3. Войшвилло Г.В. Усилители низкой частоты на электронных лампах. Изд. 2.
4. Белопольский И.И. Электропитание радиоаппаратуры. М., Энергия, 1965.
5. Лукачер. Расчет выходных трансформаторов, ж. Радиофронт No. 22 1935.