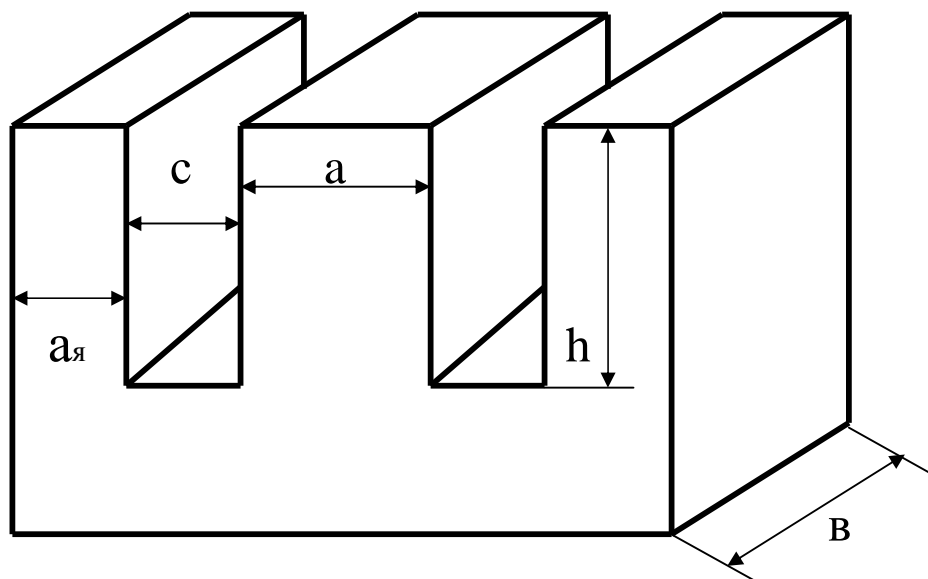


**Расчет выходного трансформатора по методикам Е.Васильченко**  
(и не только...издание исправленное и дополненное 14/07/2005)



Ориентировочно считаем необходимую нам индуктивность по формуле:

$$L = \frac{R_{aa}}{2\pi(\text{ на падение } 3\delta) \text{ или } \pi(\text{ на падение } 1\delta) \times F}$$

**Средняя длина магнитопровода** (длина магнитной силовой линии)-  
когда  $A_{я} = 1/2a$

$$l_{жс} \cong 2h + 2c + 1.5a$$

Для броневых ленточных разъемных –

$$l_{жс} \cong 2h + 2c + 0.98a$$

**Средняя длина витка намотки –**

$$l_{в} \cong 2a + 2b + 1.5c$$

Для броневых ленточных разъемных –

$$l_{в} \cong 2a + 2b + 2.9c$$

**Расчет индуктивности**

$$L \cong \frac{0.4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot W^2 \cdot Q_{жс}}{l_{жс} \cdot \left( 1 + \frac{\mu_0 \cdot l_{з}}{l_{жс}} \right)} \cdot 10^8$$

где все размеры в сантиметрах, индуктивность получается в Гн.  
значение магнитной проницаемости  $\mu$  по справочнику.  
Если нет – то это значение может быть принято 400-600.

### Электрический расчет трансформатора

**Коэффициент трансформации**

$$N = \sqrt{\frac{R_n}{h \cdot R_a}}$$

**Приведенное сопротивление обмоток-**

$$r_0 = (1 - \eta(\text{к.п.д.})) \cdot R_a$$

**Омическое сопротивление первичной и вторичной обмоток –**

$$r_1 = 0.35 \cdot r_0; \quad r_2 = N^2 \cdot (r_0 - r_1)$$

0,35 – коэффициент распределения активного сопротивления между обмотками.  
Эквивалентное сопротивление анодной цепи формируется из параллельно включенных (по переменному току) внутреннего сопротивления лампы и анодного

$$R_{\text{экв}} = \frac{(R_i + r_1) \cdot (R_a - r_1)}{R_i + R_a}$$

сопротивления:

..... **Временная пауза - Пример...(для тупых...)**

**Дано:**

**Анодное сопротивление первички  $R_a$  – 5000 Ом**

**Внутреннее сопротивление лампы  $R_i$  – 1200 Ом**

**Сопротивление нагрузки  $R_n$  – 8 Ом**

**$Q_c = 12,5$  кв.см**

**К.П.Д – 0,9**

**Выходная мощность – 20 ватт**

**Расчет:**

**Приведенное сопротивление обмоток:**

$$r_0 = (1 - 0.9) \cdot 5000 = 500(\text{Ом})$$

**Омическое сопротивление первичной и вторичной обмоток:**

$$r_1 = 0.35 \cdot 500 = 175(\text{Ом})$$

$$r_2 = N^2 \cdot (r_0 - r_1) = 0.58(\text{Ом})$$

**Эквивалентное сопротивление анодной цепи** (формируется из параллельно включенных по переменному току внутреннего сопротивления лампы и анодного сопротивления):

$$R_{\text{экв}} = \frac{(1200 + 175) \cdot (5000 - 175)}{5000 + 1200} = 842(\text{Ом})$$

**Рассчитываем ЭДС самоиндукции – (если задано напряжение на первичной обмотке,**

**то в качестве ЭДС выступает именно оно** - за минусом потерь магнитопровода:

$$E = \frac{1 + \frac{r_2}{R_H}}{N} \cdot \sqrt{P_{\text{вых}} \cdot R_H} = \frac{1 + \frac{0,58}{8}}{0,042} \cdot \sqrt{20 \cdot 8} = 321(\text{вольт})$$

**Количество витков первичной обмотки, необходимое для получения заданных величин** индукции ( $B=6000$  гауссов)

$$W_1 = \frac{E \cdot 10^8}{4 \cdot 1,11 \cdot Q_c \cdot K_c F_H \cdot B_m} = \frac{321 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 12,5 \cdot 0,95 \cdot 29 \cdot 6000} = 3599(\text{витков})$$

**Индуктивность первичной обмотки** вычислим по известной нам уже формуле – с известной долей условности примем начальную проницаемость  $\mu_0$  за 1000 при

$$L_{\text{факт}} = \frac{0,4 \cdot p \cdot m \cdot W^2 \cdot Q_c \cdot 10^{-8}}{l_c} = \frac{0,4 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 3600^2 \cdot 10 \cdot 10^{-8}}{21,3} = 76,4 \text{ Гн}$$

амплитуде магнитной индукции 100 Гаусс, сечение сердечника – с учетом коэффициента заполнения сердечника сталью)

**Частота среза каскада по нижним частотам:**

$$F_n = \frac{R_{\text{экв}}}{p \cdot L_{\text{факт}}} = \frac{842}{3,14 \cdot 76,4} = 3,5 \text{ Гц}$$

**Индуктивность рассеяния** – необходима для расчета среза по верхним частотам, в расчете участвуют количество перегородок  $m$ , высота окна (намотки)  $h$ , ширина окна  $s$  – то есть считаем, что приведенное расстояние между обмотками равно  $s$  делить на три.

В нашем примере  $M=4$  (к-во перегородок между секциями) обмоток:

$$L_s = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot W_1^2 \cdot l_g \cdot c \cdot 10^{-8}}{3 \cdot m^2 \cdot h} = \frac{0,4 \cdot 3,14 \cdot 3600^2 \cdot 22,3 \cdot 0,8 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 4^2 \cdot 5,6} = 0,03(\text{Гн})$$

**Верхняя частота среза:**

$$F_g = \frac{R_i + R_a}{2\pi \cdot L_s} = \frac{1200 + 5000}{6,28 \cdot 0,03} = 33(\text{кГц})$$

.....Пример закончен, все и все поняли, продолжаем теорию.....

### Диаметры проводов и омическое сопротивление обмоток

Как известно, сопротивление проводника можно вычислить по формуле:

$$R = r \cdot \frac{l}{Q}$$

Где  $r$  – удельное сопротивление для меди, равно  $0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{м/кв.мм}$

$l$  – длина проводника,  $Q$  – площадь его сечения

Поэтому **диаметры проводников** вычисляются через их сопротивление:

$$d_1 = \sqrt{\frac{2.23 \cdot 10^{-4} \cdot l_g \cdot W_1}{r_1}} \quad d_2 = \sqrt{\frac{2.23 \cdot 10^{-4} \cdot l_g \cdot W_2}{r_2}}$$

равно как и **омическое сопротивление обмоток** ( если задаемся диаметром проводов, исходя из других соображений – например, понижение нижней граничной частоты с помощью увеличения диаметра провода первичной обмотки, уменьшения индукции рассеяния и т.д. – а также для проверки предварительных расчетов) –

$$r_{\text{обмотки}} = \frac{2.23 \cdot 10^{-4} \cdot l_g \cdot W_{\text{обмотки}}}{d^2}$$

### Проверка качества сборки трансформатора

Сделать это довольно просто – для этого нужно включить первичную (высокоомную) обмотку в сеть 230 вольт и измерить величину тока холостого хода, который в данном случае и является током намагничивания.

Этот эксперимент довольно хорошо моделирует работу выходного трансформатора в реальном усилителе, к тому же позволяет **вычислить индукцию первичной обмотки** по формуле:

$$L = \frac{2.2}{p \cdot I_{xx}}$$

### Расчет индуктивности первичной обмотки трансформатора ( из FAO по трансформаторам):

Первичная обмотка подключается через трансформатор 100В, измеряются напряжение на ней, и ток, протекающий через неё. Затем рассчитывается по формуле

$$L = 3.2 \cdot 0.001 \cdot \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R^2}$$

Где:

L-индуктивность (Гн)

U-напряжение первичной обмотки (В)

I-ток, протекающий через первичную обмотку (А)

R-сопротивление первичной обмотки постоянному току (Ом)

**Несколько слов по поводу выбора расчетных данных-  
нижней частоты среза - 29 Гц - и  
амплитуды магнитной индукции - 6000 Гс.**

Дело в том, что обычно стараются для расчета выбрать частоту как можно ниже – по принципу – «делай хорошо – плохо оно само получится,...но будет работать...»

Что происходит в трансформаторе при увеличении индукции в 2,5 раза ( по отношению к 50 Гц)?

Примерно так же возрастают искажения тока намагничивания.

Так как доля тока намагничивания в общем токе составляет около 1/50 ( точнее, несколько меньше, так как он отстает по фазе от общего тока на 90 градусов, и речь идет не об арифметическом, а о векторном сложении токов).

КНИ тока намагничивания при величине магнитной индукции 0,3.....0,5 Тл обычно составляют около 5%....10%.

Поэтому можно ожидать, что доля нелинейности, попавшая в выходной сигнал, будет составлять 0,1%....0,2% на частоте 50 Гц.

Однако при повышении магнитной индукции растет проницаемость сердечника и его индуктивность, поэтому доля тока намагничивания в общем токе снижается.

Это снижение заметно сильнее на сердечниках, собранных из хорошей стали и с минимальным зазором, а магнитная индукция не превышает 0,7-0,9 Тл (хорошие сорта стали- М-6- ведут себя линейно до 1,2-1,4 Тл, как минимум, а хорошие сорта си-кора из М-5- и до 1,6-1,8 Тл).

В тех редчайших случаях, когда на трансформатор будет подаваться напряжение с частотой 20 Гц, произойдет небольшое увеличение нелинейных искажений - таким образом, выбор начальных данных 6000 Гс и 29 Гц вполне оправдан.

В любом случае – вклад КНИ трансформатора в общий КНИ усилителя гораздо меньше вклада выходного каскада.

**Формула Яна.....**

У Е.Васильченко количество витков  $W$  определяется по формуле:

$$W = \frac{E(\text{Э.Д.С.}) \cdot 10^8}{4 \cdot 1.11 \cdot Q_c \cdot K_c F_H \cdot B_m}$$

**«Профессор» Ян Гус (пардон, Гусман) предлагает вот что:**

$$W = \frac{\Delta B \cdot l_m}{1.257 m_z \cdot I}$$

Причем  $m_z$  расчетное ( то, что с индексом зет) получаем по формуле:

$$m_z = \frac{\Delta B}{\Delta B \cdot \frac{l_z}{l_c} + 1}$$

дельта В обычно равна половине от допустимой на данном сердечнике.

Например, на **EI**- железе М 6 **В** достигает 1,2-1,4 Тесла, потому **дельта В** на нем можно брать 4000-5000, а на **c-core** 6000-7000. ( по справочнику Эйлора индукция без зазора достигает 2,5 Тесла, а с зазором – 60% от этого параметра).

По этой формуле на **c-core** надо брать **мю** 600-700, но есть опасность, что слишком переэквивалываясь (занижая ее) с **дельта В** ( а она в знаменателе формулы Васильченко!) рискуем получить завышенное число витков первичной обмотки, что чревато не только переполнением окна – но и уменьшением диаметра провода, и, как следствие, ростом омического сопротивления первички, что повышает реальную нижнюю граничную частоту и сводит на нет, наши попытки ее понизить – то есть повышается частота нижнего среза АЧХ трансформатора (увеличение сопротивления первички ведет к увеличению эквивалентного сопротивления, а так как оно находится в числителе формулы расчета нижней частоты, то эта частота растет с ростом сопротивления).

**Собственно говоря – вот они, практические выводы по расчету – коротко и доступно:**

**Из моей практики получен такой вывод: - нужно действовать вот таким путем – по методике Е.Васильченко рассчитываем количество витков - (методом электрического расчета трансформатора- см. выше),- а потом найденное число витков подставляем в формулу Яна Гусмана –( Господь знает, откуда он ее притырил...у старика Цыкина, небось...)**

**(На самом деле, после проведения электрического расчета нужно сделать**

$$W = \frac{\Delta B \cdot l_m}{1.257 \cdot \mu_z \cdot I} \text{ откуда } \mu_z = \frac{\Delta B \cdot l_m}{1.257 \cdot I \cdot W} = \frac{\Delta B}{\Delta B \cdot \frac{l_z}{l_m} + 1}$$

**практическую прикидку на конкретное железо – только так можно прийти к окончательному числу витков W). А вот когда оно известно – причем не столько теоретически, сколько исходя из к-ва витков, влезających в конкретную катушку на конкретном сердечнике провода нужного - или имеющегося, но не меньше расчетного – диаметра,- и уже из этого W находим магнитную проницаемость для зазора (прямая формула, пересчитанная из приведенной выше, выглядит так):**

**Из формулы расчета магнитной проницаемости зазора рассчитываем величину собственно зазора ( прокладка – его половина)**

$$l_z = \frac{l_m \cdot \left( \frac{\Delta B}{\mu_z} - 1 \right)}{\Delta B} = \frac{1.257 \cdot I \cdot W - L_m}{\Delta B}$$

**и вот этот размер ( он должен получиться в сантиметрах) на 98% соответствует истинному зазору, проверенному с помощью экспериментов.**

Еще одна формула для расчета числа витков: (Д. Андроников), -

$$W = \frac{1.5 \cdot 10^7 \cdot U_{im}}{\Delta B \cdot F_n \cdot Q_s} \left( \Delta B - \frac{1}{2} B_{max} \right)$$

$F_n$  – нижняя граничная частота ;  $U_{im}$  – максимальная амплитуда

$Q_s$  – площадь сечения сердечника ; напряжения на первичной обмотке

-она, в принципе, представляет собой ту же самую формулу, что у и Е.Васильченко – только у него в числителе выходит не  $1,5 \cdot 10$  в седьмой, а  $2,25 \cdot 10$  в седьмой – почему – не знаю. Число витков по формуле Е.Васильченко выйдет немного больше, ...хотя - у него в числителе не напряжение, а Э.Д.С., которая всегда меньше напряжения, что немного компенсирует разницу в коэффициентах....

**Ну, если уже и по этой «методичке» трансформатор не получится – я тогда не знаю...**

**С уважением к тем, кто писал, и к тем, кто читал....**

**Маракуза.**

(подарок от Боки...) – «Хочу поделиться фокусами, как узнать индуктивность трансформатора, если Ваш переносной прибор не меряет такие лошадиные индуктивности. Если знаете точно его коэффициент трансформации, то

$$L_1 = L_2 \cdot \frac{1}{N^2}$$

Всё. Ещё способ, отсоединив нагрузку от усилителя, припаяйте параллельно первичке ёмкость, порядка 0,1- 0,22 микрофарады и снимите ачх. Получите шиш на частоте герц этак в районе 300- 500 Замерьте частоту эту точно, а индуктивность считаем по древней, как ..... мамонта, формуле: Индуктивность в Генри равна :25300 делить на :::: ёмкость конденсатора в микрофарадах помножить на квадрат резонансной частоты в герцах. Проверочная формула, резонанс в герцах равен : 159 делить на корень из : эль умножь на цэ, где эль в генри, цэ- в мкфарадах. Формулы ядрёные, спектралабом проверенные, кушайте на здоровье!»

И еще тип (в смысле – безвозмездный подарок...) от Сергея Комарова...«По поводу |Z| - читается: МОДУЛЬ ЗЕТ.

Это полное сопротивление, включающее в себя и активную (потери) и реактивную части.

Включив трансформатор (или дроссель, или, вообще, чего угодно, любой конденсатор, резистор, да, хоть два пальца) в сеть 220В 50Гц (или 60 - не важно), и замерив протекающий в цепи ток, мы можем по закону Ома определить сопротивление того, чего в розетку включили.

И для этого нужно поделить напряжение в розетке (которое лучше замерить тестером, поскольку там далеко не всегда бывает точно 220!) на полученный в результате измерения ток.

Далее.

На столь низкой частоте - 50 Гц - полное сопротивление катушки трансформатора будет складываться из трех составляющих:

- реактивное индуктивное сопротивление;

- сопротивление активных потерь в проводе обмотки;
- сопротивление активных потерь в магнитном поле катушки на перемагничивание сердечника.

Влиянием четвертой составляющей - реактивным емкостным сопротивлением (межвитковая емкость) на частоте 50 Гц пренебрегаем. Она будет проявляться на средних и высоких частотах и создавать неравномерность АЧХ и завал на высоких частотах, но на 50-и герцах будем считать, что ее нет. А индуктивность нам важна ведь именно на нижней частоте!

Далее.

Ну, катушка не была бы катушкой, если бы ее индуктивное сопротивление на РАБОЧЕЙ (нормируемой в справочнике) частоте не было бы главенствующим. Собственно, ради него она и мотается!

Сопротивление активных потерь в проводе обмотки мы можем измерить омметром или тестером, просто подключив его к выводам катушки и считав показания.

Сопротивление магнитных потерь ( $R_m$ ) мы определить столь простым методом не сможем, но надо помнить, что если трансформатор не вводится в насыщение, то оно весьма мало. Мало того, для грамотно спроектированного силового трансформатора сопротивление магнитных потерь должно быть приблизительно равным сопротивлению потерь в проводе обмотки ( $R_r$ ).

То есть  $R_r = R_m$ . Тогда КПД силового трансформатора будет максимальным. Однако, существуют и другие методы оптимизации – например, по экономии меди, как в советском ширпотребе и в дешевых китайских поделках. Но надеюсь, что военные трансформаторы ТАН и ТН времен СССР рассчитывались, все-таки, не на экономию, а на максимум КПД!!!

Но, если Вам все-таки хочется точно определить сопротивление магнитных потерь ( $R_m$ ), то его можно определить через КПД трансформатора, как разницу между полными потерями мощности и потерями в проводе обмотки. Методика его определения должна быть такой:

- замерить активные сопротивления первичной ( $R_1$ ) и вторичной ( $R_2$ ) обмотки трансформатора .
- включить первичную обмотку трансформатора к источнику переменного напряжения (не выше номинального!);
- подключить ко вторичной обмотке трансформатора активную нагрузку (разумеется, выбрав ее не больше мощности трансформатора и не превышая предельный ток его вторичной обмотки);
- замерить токи в первичной ( $I_1$ ) и во вторичной ( $I_2$ ) обмотках (они не должны быть больше предельных значений для данного трансформатора);
- замерить напряжения на первичной ( $U_1$ ) обмотке и на активной нагрузке ( $U_2$ );
- рассчитать мощность, потребляемую первичной обмоткой  $P_1 = U_1 \times I_1$ ;
- рассчитать мощность в нагрузке  $P_n = U_2 \times I_2$ ;
- рассчитать полную мощность потерь в трансформаторе  $P_p = P_1 - P_n$ ;
- рассчитать мощность активных потерь  $P_r = I_1 \times R_1 + I_2 \times R_2$
- рассчитать мощность магнитных потерь  $P_m = P_p - P_r$
- рассчитать сопротивление магнитных потерь в пересчете к первичной обмотке  $R_m = P_m / (I_1 \text{ в квадрате})$ .

Разумеется, во всех измерениях и расчетах используются основные единицы: Вольты,



Амперы, Омы, Ватты.

Но еще раз повторяю, делать столь нудный расчет, чтобы лишь убедиться, что  $R_r$  приблизительно равно  $R_m$ , едва ли стоит. Конечно, если трансформатор посчитан и намотан в домашних условиях «на коленке» и по средне – потолочной методике, то значения  $R_r$  и  $R_m$  могут разниться хоть на порядки в любую сторону!

Однако, с точки зрения качества звука, лучше, все-таки, выбрать  $R_m$  значительно меньше, чем  $R_r$ . Поскольку сопротивление провода линейное и не зависит от протекающего тока, а сопротивление  $R_m$  – нелинейное и при приближении к насыщению сердечника становится очень нелинейным, лучше все-таки использовать трансформаторы на пониженных напряжениях и при значениях магнитной индукции ( $B$ ) на линейном участке петли гистерезиса.

Для распространенных холоднокатаных электротехнических сталей, желательно, чтобы магнитная индукция ( $B$ ) от значения которой напрямую зависит  $R_m$ , не превышало бы 1,2 Тесла (12 000 Гаусс) на самой нижней рабочей частоте выходного трансформатора.

А если мы претендуем на «Супер-Пупер-Высококачественное звучание», то, нежелательно подниматься и за значения 0,8 – 0,9 Тесла.

Кстати! Силовые трансформаторы, рассчитанные и намотанные под значение  $B = 1,2$  Т, вообще не греются и напряжение на вторичных обмотках почти не просаживают!!! Именно такие расчетные значения использовал в свое время, когда был разработчиком в оборонке.

Индуктивное сопротивление можно рассчитать так:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - (2R_1)^2}$$

Далее, все просто.

Индуктивное сопротивление делим на «два-пи-эф» и получаем индуктивность обмотки-

$$L = \frac{X_L}{2\pi \cdot F} ; \text{ Если вспомним то, что предлагает выше Е.Васильченко –}$$

$$L = 3.2 \cdot 0.001 \cdot \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R^2}$$

то увидим, что это одно и то же...что лишний раз доказывает – все проходит, а физика – вечна...