

Считаем выходной трансформатор гитарного усилителя.

В помощь тем, кто испытывает трудности с расчётами выходных PP трансов гитарных усилителей с нижней рабочей частотой 50-80Гц.

Известно, что выходной трансформатор – сплошные компромиссы. Улучшая один параметр, обязательно ухудшаем другой. Например, при перестраховке по F_n и (или) величине B_m , значительно увеличиваются размеры и вес трансформатора, падает к.п.д., увеличивается индуктивность рассеяния; для её уменьшения приходится увеличивать секционирование; увеличив секционирование, увеличили ёмкость трансформатора... Поэтому, перед началом расчёта необходимо правильно определить исходные данные, и не создавать излишний запас.

Ргаб.*К

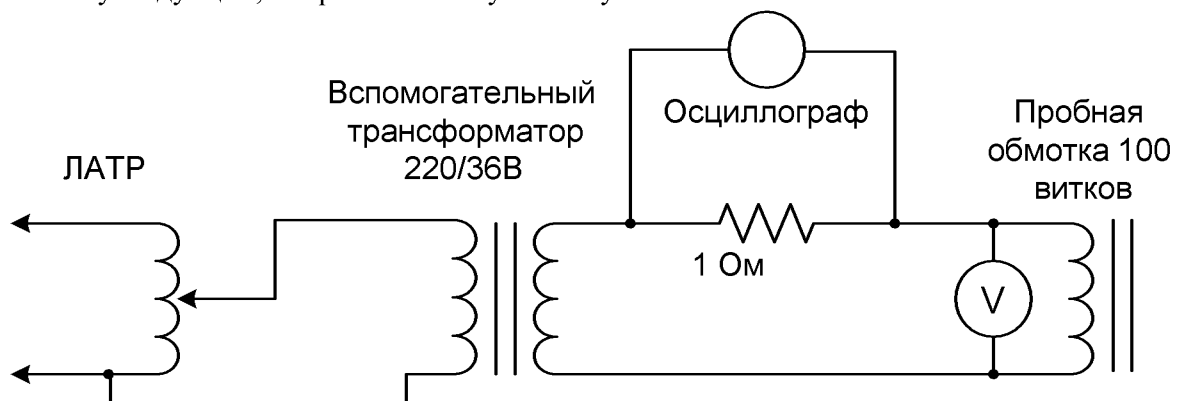
1. Выбираем сердечник. $ScSok = \frac{P_{габ} * K}{0,022 * F * K_c * K_z * B_m * i}$, $P_{габ} = P_{вых} / \eta$, где

$ScSok$ – произведение площади сечения сердечника на площадь окна, в $см^4$; K – запас по мощности для сердечника; F – нижняя рабочая частота, Гц; K_c – коэффициент заполнения сердечника сталью, обычно 0,9-0,95; K_z – коэффициент заполнения окна медью, для 100-ваттных обычно 0,25-0,27, уменьшается для 10-20 – ваттных до 0,19-0,21; B_m – индукция, в Тесла; i – плотность тока, в $A/мм^2$. Для выходных трансформаторов плотность тока для получения к.п.д. (η) > 0,91 – 0,92 может быть выбрана по формуле:

$i \approx B_m * \sqrt{\frac{F}{7,7}}$, для магнитопроводов ШЛ i следует уменьшить на 25-35%

Исходя из опыта, принимаю индукцию на нижней рабочей частоте для 100-ваттника 1 - 1,1Тл, для 50-ваттника не менее 0,8-0,85Тл, для 10-20 ваттника 0,7-0,75Тл. Нижнюю рабочую частоту для гитарного усилителя беру 65-70Гц, $K \approx F / 50$. Почему такой маленький запас по сердечнику, ведь оконечник гитарного усилителя может сильно перегружаться? Это так, однако даже при 100% перегрузке оконечника величина первой гармоники остаётся неизменной. Остальная мощность приходится на 3, 5, 7...гармоники, уровень их намного меньше первой, а габаритная мощность трансформатора на этих частотах остаётся практически неизменной.

Для имеющегося сердечника с подходящим $ScSok$ можно точно найти допустимую величину индукции, собрав несложную схему:



Плавно увеличивая напряжение, фиксируем показания вольтметра на пробной обмотке при начале заметных искажений синусоиды (пик тока на 10-15% превышает верхушку синусоиды). Индукцию определяем по формуле:

$$B_m = 0,45 * U / Sc$$

2. Переменное напряжение на первичной обмотке $U_m = \sqrt{P_{раб.}} \cdot \sqrt{R_{a-a}}$.

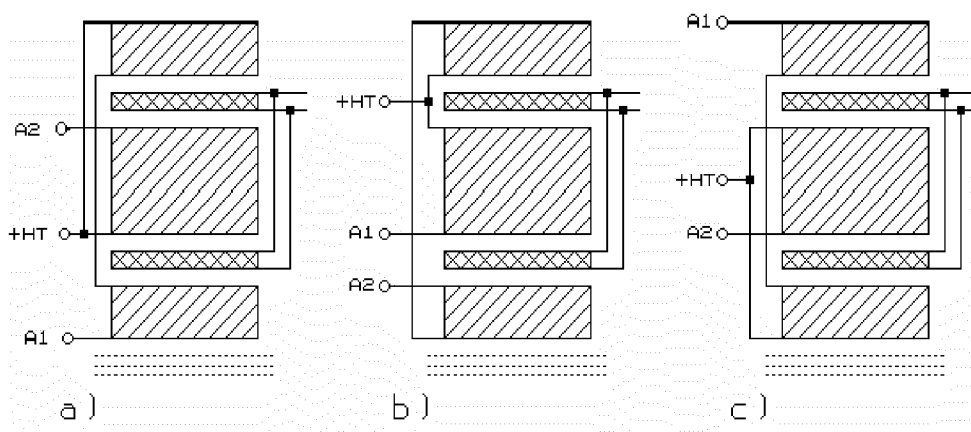
3. Число витков на вольт: $W_0 = \frac{2,25 \cdot 10^3}{S_c \cdot B_m \cdot F}$, где

S_c – сечение сердечника в $см^2$, с учётом K_c , B_m – индукция, в Тл, F – нижняя рабочая частота.

4. Число витков первички $W_1 = U_m \cdot W_0$, вторички $W_2 = W_1 / \sqrt{\frac{R_{a-a} \eta}{R_n}}$

R_n подставляем на высшее сопротивление нагрузки.

5. Выбираем тип секционирования и рассчитываем индуктивность рассеяния. В большинстве случаев для выходных трансов гитарных усилителей достаточно такого секционирования:



или более традиционного: В-П-В-П-В

$$L_s = \frac{0,4\pi \cdot W_1^2 \cdot \ell_0 \cdot 10^{-8}}{(m-1)^2 \cdot h_c} \cdot \left((m-1) \cdot \delta + \frac{A_1 + A_2}{3} \right) \text{ Гн, где}$$

ℓ_0 – средняя длина витка в см; m – число секций трансформатора; h_c – длина намотки в см; δ – толщина межобмоточной изоляции в см; A_1 и A_2 – толщина первичной и вторичной обмоток в см. Для предварительного расчёта можно принять $((m-1) \cdot \delta + (A_1 + A_2)/3) \approx (m-1) \cdot \delta + c/3,2$, где c – высота окна трансформатора в см; $\ell_0 = 2a + 2b + 8dk + 2,5 \cdot c$, где a, b – размеры сердечника трансформатора в см; dk – толщина материала катушки в см.

Формула подсчёта L_s даёт достаточно точный результат только при условии полного заполнения всех слоёв трансформатора.

Для хорошего трансформатора гитарного усилителя $L_s(\text{Гн}) \leq \frac{R_{a-a}}{250000}$

Если соответствует – продолжаем расчёт, если нет – увеличиваем секционирование, например, 4 секции первички, между ними 3 секции вторички.

6. Предварительно диаметры проводов (по меди) выбираем по плотности тока. В усилителях, работающих в классе АВ, рекомендую уменьшить плотность тока в первичке на 15-25%, пропорционально увеличив его во вторичке.

$$d1 \text{ (мм)} = 1,13\sqrt{\frac{U_m}{Ra \text{ (Ом)} * i}}, \quad d2 = 1,13\sqrt{\frac{U_n}{R_n * i * n}}, \text{ где } n \text{ – число параллельно включенных}$$

секций вторичной обмотки. **d2** выбираем по самой нагруженной обмотке, обычно 4 Ом, подставляя соответствующее напряжение.

7. Далее корректируем диаметры проводов и числа витков. Задача – избежать незаполненных слоёв, как первички, так и вторички и максимально заполнить окно сердечника.

Число витков в одном слое первички $W1c \approx Ky * (h - 3 dk) / D1$. **D1** – диаметр провода первички с изоляцией; **h** – длина окна в мм; **Ky** – коэффициент укладки провода (см. таблицу).

$d_{из}$, mm	0,06-0,2	0,21-0,3	0,31-0,4	0,41-0,65	0,65 -0,85	0,86-1,05	свыше 1,06
Ky	0,83	0,86	0,92	0,93	0,95	0,92	0,9

$W1 / W1c = n1$ – должно получиться целое число, кратное и 2 и 4 (для секционирования В-П-В-П-В достаточно $W1 / W1c$ кратное двум). Если получилось, идём дальше, нет – корректируем диаметр провода или число витков, проверяем. Иногда получается, что при выбранных **Vm**, **F**, **i** требуется слишком большая корректировка, тогда приходится выбирать другой сердечник, или корректировать **Vm**, **F**.

Если корректировали число витков первички, необходимо скорректировать и вторичку. Число витков в одном слое вторички $W2c \approx Ky * (h - 3 dk) / D2$. У выходного трансформатора с «довесками» на 8 или 16 Ом получаются слишком разные характеристики на разных нагрузках, поэтому рекомендуем секционировать все вторички. Варианты укладки вторичек такие: $W2 / W2c = 2, 3$ или 4 . Для $W2 / W2c = 2$, 4-омная обмотка помещается в один слой, вторым слоем идёт домотка до 8 Ом, провод выводится, и во втором же слое домотываем до 16 Ом. Для $W2 / W2c = 3$, 4-омная нагрузка займёт первый слой и 40-42% второго, 8-омная домотка закончит второй слой, 16-омная – третий слой. Так же корректируем диаметр провода, чтобы слои были завершёнными.

8. Проверяем, влезет ли это в окно:

$$A = Kp * (p1 * D1 + (p1 - 1) * d_{из}) + Kp * (p2 * D2 + (p2 - 1) * d_{из}) + A_{из} + dk, \text{ где}$$

Kp – коэффициент разбухания обмоток (1,14-1,16); **p1**, **D1** – количество слоёв и диаметр провода с изоляцией первичной обмотки; **p2**, **D2** – количество слоёв и диаметр провода с изоляцией вторичной обмотки; **A_{из}** – толщина межобмоточной изоляции. Если **c** – **A** меньше 1-1,5 мм, есть риск, что обмотки не поместятся в окне, зависит от опыта намотчика. Если **c** – **A** > 0,25-0,3 **c** может понадобиться пересчёт.

$$9. \text{ Вычисляем сопротивления обмоток. } R1 = \frac{\ell_0 * W1^4 * 0,0175}{100 * d1^2 * \pi}, \quad R2 = \frac{\ell_0 * W2^4 * 0,0175}{100 * d2^2 * \pi * n}$$

10. Проверяем приведённое сопротивление

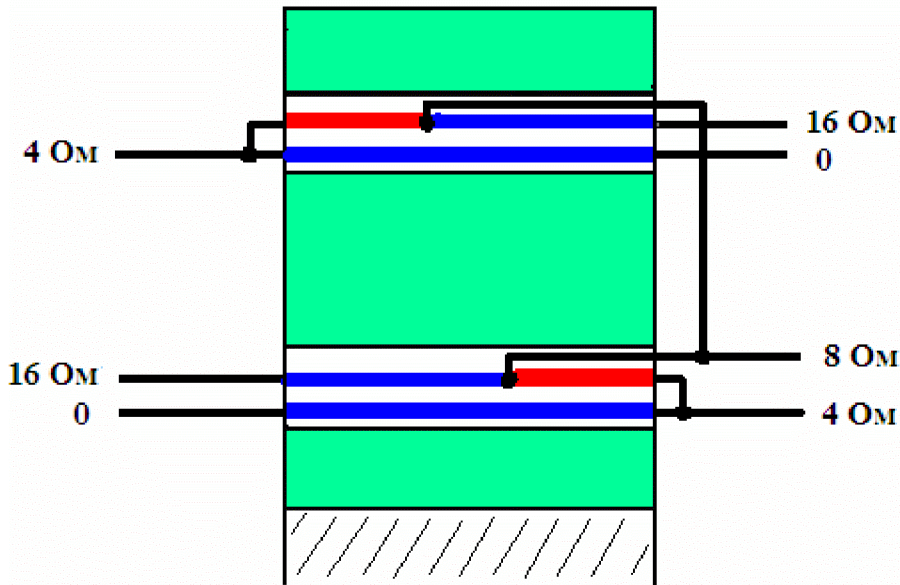
$$Ra-a = 4 \left(\left(0,5 \frac{W1}{W2} \right)^2 * Rn + 0,5 R1 * \left(\frac{Ia \text{ max} - Ia0}{Ia \text{ max}} \right) + \left(0,5 \frac{W1}{W2} \right)^2 * R2 \right),$$

где **R1**, **R2** – посчитанные сопротивления первичной и вторичной обмоток, **Ia max**, **Ia0** – пиковый ток и ток покоя одного плеча пуш – пулла.

$$11. \eta = (W1/W2)^2 * Rn / Ra-a.$$

Если чего-то не нравится – корректируем, считаем, проверяем...

В завершении небольшая хитрость: вторая выходная обмотка (или средняя для секционирования В-П-В-П-В) наматывается от другой щеки с целью уменьшения индуктивности рассеяния для 8-омной обмотки – этот простой приём позволяет уменьшить её в 1,5 раза. Дело в том, что часть обмотки (красным цветом) лишь частично перекрывает окно, развернув обмотку №4, мы перекрываем окно с другой стороны:



Несколько советов. Для выходных трансов предпочтительней железо с длинным и узким окном, т.е. ШЛ при одинаковой габаритной мощности несколько хуже, чем ШЛм. Желательно рассчитывать так, чтобы не оставалось незаполненных слоёв, т.к. возрастает индуктивность рассеяния, уменьшается коэффициент заполнения окна медью, габаритная мощность трансформатора. Количество секций выходного трансa должно быть нечётным, нижняя и верхняя секция должна принадлежать одной обмотке. Не мотайте «внавал», изоляция между слоями гарантирует от пробоев внутри обмотки и создаёт ровную поверхность для намотки следующего слоя. Межобмоточную изоляцию не следует делать меньше 0,2мм; лучше 0,25 – 0,3мм, этим мы увеличиваем пробивное напряжение и уменьшаем ёмкость первичка/вторичка. И наконец – вы можете посчитать трансформатор, выбирая **V_m**, **K**, **i**, **K** согласно своим соображениям, никаких ограничений нет.

Илья Овчинников, aka Наблюдатель.