

# Расчет выходных трансформаторов

С. Кризе

В радиолюбительской практике часто возникает необходимость рассчитать выходной трансформатор приемника или усилителя низкой частоты. Данного выходного трансформатора в значительной степени определяют качество работы всей установки и поэтому их следует выбирать в строгом соответствии с условиями работы выходной ступени — ее схемой, типом ламп и их режимом.

Условия работы любого трансформатора с железным сердечником зависят от наличия в сердечнике постоянного магнитного потока. При работе выходного трансформатора в однотактной схеме постоянная составляющая анодного тока проходит по его первичной обмотке и создает в сердечнике постоянное подмагничивание. Присутствие подмагничивания неблагоприятно оказывается на работе трансформатора, значительно снижая магнитную проницаемость материала сердечника. Для получения заданной индуктивности первичной обмотки трансформатора приходится увеличивать его размеры. Введение в сердечник такого трансформатора небольшого зазора из немагнитного материала (воздух, бумага или картон) уменьшает магнитное насыщение сердечника и повышает его магнитную проницаемость.

Значительно более благоприятны условия работы трансформаторов, не имеющих постоянного магнитного потока в сердечнике, например, трансформаторов двухтактных схем. За счет большего значения магнитной проницаемости материала сердечника, при прочих равных условиях, размеры трансформатора, работающего без подмагничивания, меньше размеров трансформатора, работающего с подмагничиванием.

## РАСЧЕТ ВЫХОДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ОДНОТАКТНЫХ СХЕМ

Расчет выходного трансформатора следует начинать с выбора типа и размеров сердечника. Если тип пластины сердечника задан, то необходимо определить лишь толщину набора.

В маломощных трансформаторах низкой частоты (до 100 вт) обычно применяются сердечники броневого типа, набираемые из Ш-образных пластин толщиной 0,3—0,5 мм (рис. 1).

Размеры трансформатора зависят от его мощности. Для сердечника данного типа характерной величиной, определяющей максимальную мощность трансформатора, является произведение  $Q_{ж}Q_o$ , где  $Q_{ж}$  — площадь сечения железа ( $Q_{ж}=a \cdot b$ ),  $Q_o$  — площадь окна, в котором размещаются обмотки ( $Q_o=c \cdot h$ ).

Увеличение площади сечения железа ( $Q_{ж}$ ) позволяет уменьшить количество витков обмоток трансформатора при неизменной индуктивности его первичной обмотки  $L_1$ . Это в свою очередь дает возможность выполнить обмотки проводом боль-

шего диаметра, т. е. увеличить ток<sup>2</sup> в обмотках трансформатора, а следовательно, и его мощность.

Если при неизменном  $Q_{ж}$  увеличивать  $Q_o$ , то это также позволяет собрать трансформатор большей мощности, так как появляется возможность увеличить напряжение (за счет повышения числа витков) или ток (за счет увеличения диаметра провода) обмоток трансформатора.

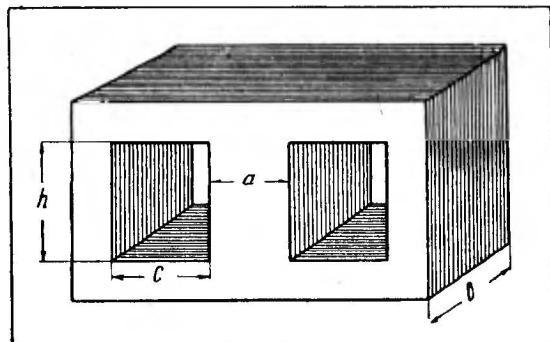


Рис. 1. Сердечник броневого типа (Ш-образный)

Геометрические размеры трансформатора, работающего с подмагничиванием, можно найти по заданной мощности из выражения

$$Q_o \cdot Q_{ж} = A \cdot P, \quad (1)$$

где  $Q_o$  — площадь окна в кв. см,  
 $Q_{ж}$  — площадь сечения железа в кв. см,  
 $P$  — мощность трансформатора в вт,  
 $A$  — коэффициент, зависящий от условий работы выходной ступени, типа применяемых ламп и от наличия отрицательной обратной связи.

Значения  $A$  для различных условий работы выходной ступени приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип лампы в выходной ступени	Схема усилителя	$A$
Пентод или тетрод	Без отрицательной обратной связи . . . . .	20
	С отрицательной обратной связью . . . . .	10
Триод	Без отрицательной обратной связи . . . . .	10
	С отрицательной обратной связью . . . . .	5

Для облегчения расчетов вместо формулы можно пользоваться графиком, приведенным на рис. 2.

Если, например, выходная ступень собрана на триоде и схема работает без отрицательной обратной связи, то для выходной мощности  $P=3 \text{ вт}$  произведение  $Q_o \cdot Q_{jk}$  должно быть не менее  $30 \text{ см}^4$ .

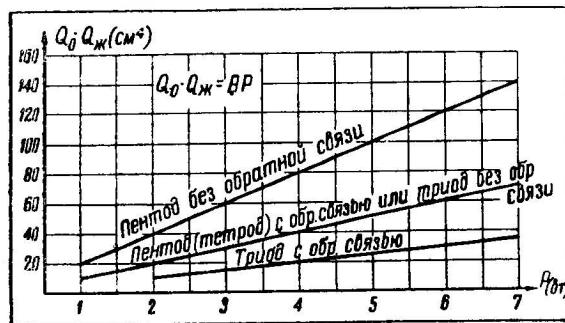


Рис. 2. График зависимости размеров трансформатора, работающего с подмагничиванием, от его мощности

При этом можно взять сердечник с  $Q_{jk}=3 \text{ см}^2$  при  $Q_o=10 \text{ см}^2$  или же  $Q_{jk}=6 \text{ см}^2$  и  $Q_o=5 \text{ см}^2$ . Практически же при выборе соотношения между сечением железа и сечением окна следует учитывать,

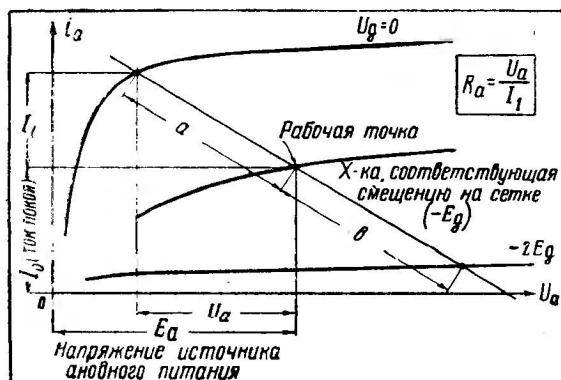


Рис. 3. Определение наивыгоднейшего сопротивления нагрузки для пентода или тетрода

что увеличение  $Q_o$  повлечет за собой увеличение расхода провода, а увеличение  $Q_{jk}$  потребует большего количества трансформаторного железа. Поэтому в большинстве случаев целесообразно выбирать  $Q_o$  и  $Q_{jk}$  приблизительно равными.

Для расчета выходного трансформатора необходимо знать сопротивление нагрузки  $R_a$  анодной цепи лампы выходной ступени, величина которого зависит от типа применяемой лампы и режима ее работы. Сопротивление анодной нагрузки для триода можно определить из выражения:

$$R_a = (2 - 3) R_i, \quad (2)$$

где  $R_i$  — внутреннее сопротивление лампы, определяемое из характеристик или по справочнику.

Наивыгоднейшее сопротивление анодной нагрузки для пентода или тетрода определить несколько труднее. Приближенно можно считать, что  $R_a = 0.1 R_i$ . Для более точного определения величины  $R_a$  следует из динамической характеристики лампы (рис. 3) найти амплитуду напряжения в цепи анода  $U_a$  и амплитуду тока  $I_1$ . Динамическую характеристику лампы необходимо построить под таким углом, чтобы ее отрезки  $a$  и  $b$  были равны между собой. Тогда

$$R_a = \frac{U_a}{I_1}, \quad (3)$$

где  $I_1$  выражено в амперах.

Ориентировочное значение  $R_a$  для нескольких типов ламп дано в таблице 2.

Таблица 2

Тип лампы	Сопротивление анодной нагрузки $R_a$ в омах	Анодный ток покоя $I_0$ в ма
6П6 (6Ф6)	7 000—8 000	35
6П2 (6V6)	5 000—6 000	40
6П3 (6Л6)	3 000—4 000	75
2П3 (СБ-258)	15 000	10
6Ж4Б (6AG7)	7 000—8 000	35

Зная  $R_a$ , легко определить индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора  $L_1$ , которая обеспечит удовлетворительное воспроизведение низших звуковых частот.

Если в выходной ступени включен пентод, то  $L_1$  определяется из выражения:

$$L_1 = \frac{R_a}{400}, \quad (4)$$

где величина  $L_1$  выражена в генри,  $R_a$  — в омах. Для триода расчетное выражение имеет вид:

$$L_1 = \frac{R_a}{1 000}; \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) справедливы для схем усилителей без отрицательной обратной связи. Если же выходная ступень охвачена обратной связью, то  $L_1$  можно взять приблизительно вдвое меньше, чем это следует из приведенных выражений.

Затем переходят к определению числа витков обмоток трансформатора.

Число витков первичной обмотки  $W_1$ , обеспечивающее заданную индуктивность  $L_1$ , находится из формулы:

$$W_1 = 10 \frac{L_1 I_0}{Q_{jk}} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{3 000 Q_{jk} l_{jk}}{L_1 I_0^2}} \right], \quad (6)$$

где  $I_0$  — постоянная составляющая анодного тока выходной лампы в ма;  $Q_{jk}$  — площадь сечения сердечника в кв. см и  $l_{jk}$  — длина средней магнитной силовой линии в см. Величины  $Q_{jk}$  и  $l_{jk}$  для некоторых типов сердечников приведены в таблице 3.

Таблица 3

Таблица основных справочных данных некоторых типов броневых сердечников

Тип сердечника	<i>a</i> <i>см</i>	<i>b</i> <i>см</i>	<i>c</i> <i>см</i>	<i>h</i> <i>см</i>	<i>Q<sub>ж</sub></i> <i>см<sup>2</sup></i>	<i>Q<sub>0</sub></i> <i>см<sup>2</sup></i>	<i>Q<sub>ж</sub>Q<sub>0</sub></i> <i>см<sup>4</sup></i>	<i>l<sub>0</sub></i> <i>см</i>	<i>l<sub>ж</sub></i> <i>см</i>	<i>V<sub>ж</sub></i> <i>см<sup>3</sup></i>	<i>P<sub>вт</sub></i> для трансформатора с подмагничиванием	<i>P<sub>вт</sub></i> для трансформатора без подмагничивания
Ш-11	1,1 1,1	1,0 2,0	1,15 1,15	3,4 3,4	1,1 2,2	3,9 3,9	4,3 8,6	6,0 9,0	10 10	11 12	0,2 0,4	0,8 1,6
Ш-15	1,5 1,5	1,5 3,0	1,35 1,35	2,4 2,4	2,25 4,5	3,24 3,24	7,3 14,6	10,0 13,0	11 11	25 50	0,35 0,7	1,0 2,0
Ш-19	1,9 1,9	2,0 4,0	1,7 1,7	4,6 4,6	3,8 7,6	7,8 7,8	29,6 59,2	13,0 17,0	15 15	57 114	1,5 3,0	7,5 <sup>*</sup> 15
Ш-20 (укорочен- ный раз- мер)	2,0 2,0	2,0 4,0	1,0 1,0	3,0 3,0	4,0 8,0	3,0 3,0	12,0 24,0	13,0 17,0	12 12	48 96	0,6 1,2	1,5 3,0
Ш-25	2,5 2,5	2,5 50	2,5 2,5	6,0 6,0	6,25 12,5	15,0 15,0	94,0 188,0	17,0 22,0	20 20	125 250	5 10	35 70
Ш-30	3,0 3,0	3,0 6,0	1,5 1,5	4,5 4,5	9,0 18,0	6,75 6,75	61,0 122,0	18,0 24,0	18 18	162 324	3 6	10 20
Ш-40	4,0 4,0	4,0 8,0	3,0 3,0	7,0 7,0	16,0 32,0	21,0 21,0	335,0 670,0	22,0 30,0	28 28	445 990	17,5 35	250 500

Примечание. Мощности трансформаторов указаны ориентировочно для усилителей, работающих на пентодах без отрицательной обратной связи.

Формула (6) дает точный результат, но вычисления по ней несколько сложны. В ряде практических случаев можно пользоваться более простой приближенной формулой:

$$W_1 = \frac{45 L_1 I_0}{Q_{\text{ж}}}. \quad (6a)$$

Для определения числа витков вторичной обмотки необходимо знать коэффициент трансформации *n*, который можно найти из выражения:

$$n = \sqrt{\frac{R_{\text{н}}}{R_a}}, \quad (7)$$

где *R<sub>н</sub>* — сопротивление нагрузки во вторичной обмотке трансформатора, обычно — сопротивление звуковой катушки динамика.

Далее находим число витков вторичной обмотки:

$$W_2 = n W_1 \quad (8)$$

и диаметр провода первичной обмотки в мм:

$$d_1 = 0,015 \cdot \sqrt{\frac{l_0 W_1}{r_1}}, \quad (9)$$

где *l<sub>0</sub>* — средняя длина витка в см (см. таблицу 3), *r<sub>1</sub>* — активное сопротивление первичной обмотки, которое обычно берется равным 0,1 *R<sub>a</sub>*.

Во избежание перегрева первичной обмотки трансформатора необходимо проверить, не превышает ли полученная плотность тока допустимой величины. Проверить можно непосредственно величину диаметра провода по формуле (10):

$$d_1 \geq 25 \sqrt{l_0}, \quad (10)$$

где  $d_1$  — в *мм*,  $I_0$  — в *ма*. Если получившийся диаметр  $d_1$  удовлетворяет этому выражению, то определяем далее диаметр провода вторичной обмотки:

$$d_2 = \frac{d_1}{\sqrt{n}}. \quad (11)$$

Наконец, определяем длину зазора в сердечнике из немагнитного материала:

$$l_3 = \frac{W_1 I_0}{800}, \quad (12)$$

где  $l_3$  выражено в *мм*,  $I_0$  — в *а.*

Последним этапом расчета является проверка размещения обмоток в окне сердечника.

#### Пример расчета выходного трансформатора для однотактной схемы

Рассчитать выходной трансформатор к однотактному усилителю, на выходе которого работает пентод 6П6 (6Ф6) при мощности  $P=2,5$  *вт*. Отрицательная обратная связь в схеме отсутствует. Сопротивление звуковой катушки динамика  $R_a = 10$  *ом*.

Для выбора типа сердечника найдем произведение площади сечения железа на площадь окна по формуле (1), приняв  $A = 20$ :

$$Q_{ж} \cdot Q_o = 20 P = 50 \text{ см}^4.$$

Пользуясь таблицей 3, выбираем тип сердечника. Наиболее подходящим является сердечник Ш-19×40, для которого  $Q_{ж}Q_o = 59,2 \text{ см}^4$ , что несколько превышает требуемое значение ( $50 \text{ см}^4$ ). Остановившись на железе типа Ш-19, найдем минимальную толщину набора сердечника  $b$ :

$$Q_{ж} = \frac{50}{Q_o} = \frac{50}{7,8} = 6,4 \text{ см}^3;$$

$$b = \frac{Q_{ж}}{a} = \frac{6,4}{1,9} = 3,35 \text{ см} \approx 3,4 \text{ см.}$$

Итак, берем сердечник Ш-19×34, для которого

$$Q_{ж} = 6,5 \text{ см}^3, \quad l_{ж} = 15 \text{ см}, \quad l_0 = 15 \text{ см.}$$

Пользуясь таблицей 2, находим для заданной лампы  $R_a = 800$  *ом*,  $I_0 = 35$  *ма*.

Индуктивность первичной обмотки  $L_1$  находим по формуле (4):

$$L_1 = \frac{R_a}{400} = \frac{8000}{400} = 20 \text{ гн.}$$

Число витков первичной обмотки определяем по формуле (6):

$$\begin{aligned} W_1 &= 10 \frac{L_1 I_0}{Q_{ж}} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{3000 Q_{ж} l_{ж}}{L_1^2}} \right] = \\ &= 10 \frac{20 \cdot 35}{6,5} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{3000 \cdot 6,5 \cdot 15}{20 \cdot 35^2}} \right] = \\ &= 4950 \text{ витков.} \end{aligned}$$

Сопоставляя полученное число витков с результатом расчета по приближенной формуле (ба):

$$W_1 = \frac{45 L_1 I_0}{Q_{ж}} = \frac{45 \cdot 20 \cdot 35}{6,5} = 4850 \text{ витков,}$$

видим, что разница незначительна. Принимаем окруженно  $W_1 = 5000$  витков.

Подсчитываем далее по соответствующим формулам остальные данные трансформатора.

Коэффициент трансформации:

$$n = \sqrt{\frac{10}{8000}} = \frac{1}{28,3} = 0,0353.$$

Число витков вторичной обмотки

$$W_2 = n W_1 = \frac{1}{28,3} \cdot 5000 = 176 \text{ витков.}$$

Диаметр провода первичной обмотки:

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{15}{1000} \sqrt{\frac{l_0 W_1}{r_1}} = \\ &= \frac{15}{1000} \sqrt{\frac{15 \cdot 5000}{800}} = 0,15 \text{ мм,} \end{aligned}$$

где  $r_1 = 0,1$ ,  $R_a = 800$  *ом*.

Проверяем  $d_1$  по формуле (10):

$$d_1 > 25 \sqrt{l_0} = 25 \sqrt{35} = 0,148 \text{ мм.}$$

Мы приняли  $d_1 = 0,15$ , следовательно, трансформатор перегреваться не будет.

Диаметр провода вторичной обмотки:

$$d_2 = \frac{d_1}{\sqrt{n}} = \frac{0,15}{\sqrt{28,3}} = 0,8 \text{ мм.}$$

Изоляцию провода для обеих обмоток берем эмалевую.

Находим длину зазора в сердечнике:

$$l_3 = \frac{W_1 I_0}{800} = \frac{5000 \cdot 35}{800 \cdot 1000} = 0,22 \text{ мм.}$$

В сердечнике броневого типа зазор состоит из двух промежутков, разрывающих магнитную цепь трансформатора (рис. 4); поэтому толщина про-

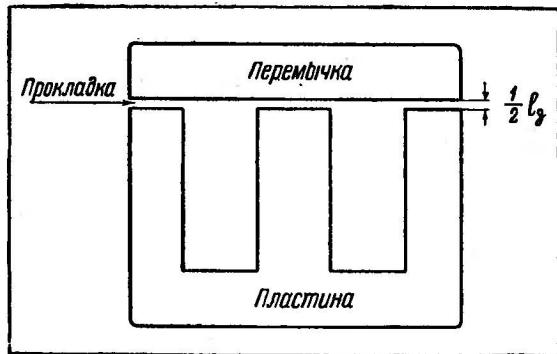


Рис. 4. Сборка сердечника с зазором

кладки должна быть вдвое меньше требуемой длины зазора:

$$l_{пр} = \frac{l_3}{2} = 0,11 \text{ мм.}$$

Проверяем размещение обмоток. Эскиз катушки (в разрезе) для железа Ш-19 показан на рис. 5. Найдем число витков в слое первичной обмотки ==  $= \frac{42}{d_{1из}} = \frac{42}{0,17} = 240$  витков, где  $d_{1из} = 0,17$  *мм* — диаметр провода обмотки I с учетом изоляции.

(Окончание см. на стр. 34)