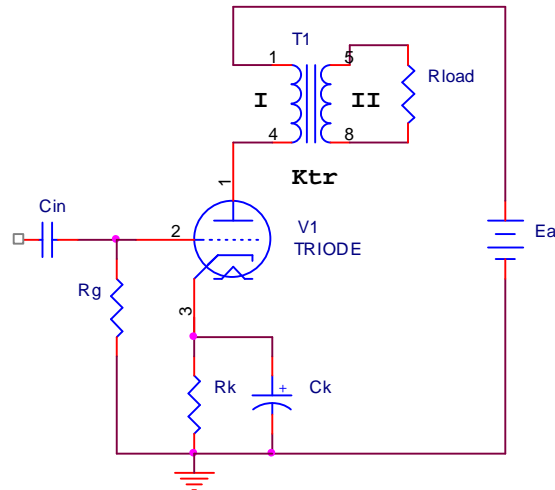


Триод для чайников.

(с)2004 Александр Торрес, Ейндховен, Голландия.

В связи с многочисленными вопросами «а как рассчитать ламповый каскад», а также по просьбе нескольких моих друзей, я решил написать небольшое «пособие для полных чайников» (*просьба на обижаться на «чайников» - в отличие от «ламера» это не обидно, любой человек чего-то не знает*). Изложение максимально упрощенное, практически – достаточно знать только закон Ома, специалисты могут не читать **J**

Типовой выходной каскад с автосмещением:



Здесь:

C_{in} – входной разделительный конденсатор.

R_g – сеточный резистор утечки.

$V1$ – триод.

R_k – катодный резистор (резистор автосмещения).

C_k – катодный конденсатор.

$T1$ – выходной трансформатор с коэффициентом трансформации K_{tr} .

E_a – источник анодного питания.

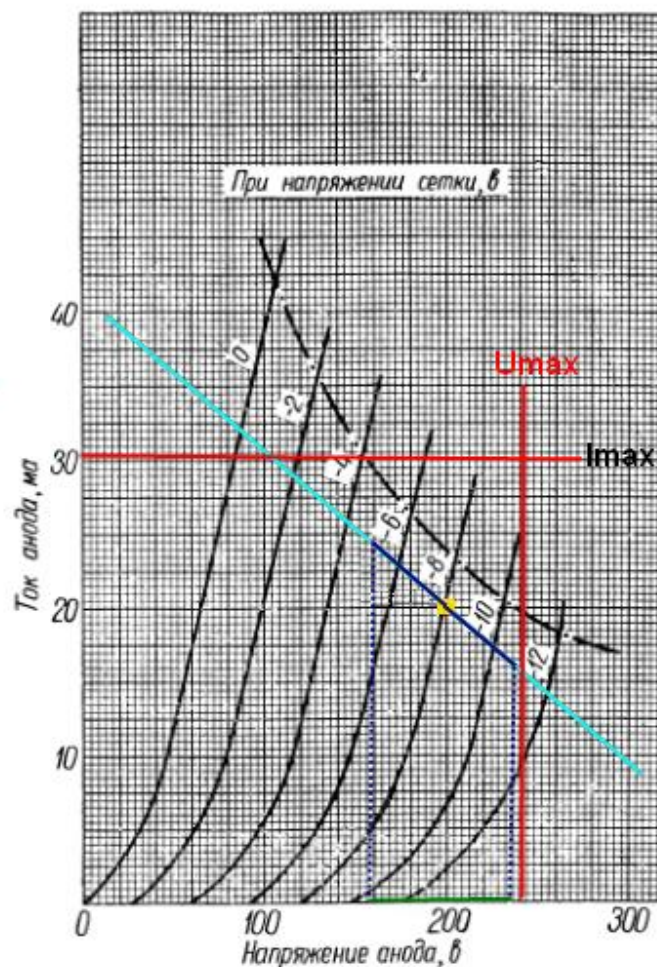
В случае фиксированного смещения, R_k и C_k отсутствуют, катод триода подключен непосредственно к общему проводу (минусу анодного источника питания), а нижний конец резистора R_g подключен к напряжению смещения.

Итак, в чем же состоит «расчет»? Как правило, желающий построить усилитель выбирает лампу, под нее требуется рассчитать напряжения, токи, сопротивления резисторов, конденсаторов, а также выходной трансформатор.

Исходные данные для расчета:

- 1) Напряжение анод-катод в рабочей точке (при отсутствии сигнала).
- 2) Ток анода в рабочей точке.

Выбор этих (а также и других) параметров производится по максимально допустимым параметрам конкретной лампы и по ее вольт-амперной характеристике (ВАХ). Также по ней определяется динамическое сопротивление лампы R_i . На рисунке ниже показана ВАХ некоего триода. Черные, идущие вверх кривые – характеристики лампы при разном напряжении сетка-катод. Красными линиями ограничены максимальные напряжение и ток анода, а черной гиперболой – максимальная мощность на аноде.



Правило первое – превышать максимальные значения нельзя:

- превышение напряжения чревато пробоем между электродами лампы,
- превышение тока анода и мощности на аноде чревато уменьшением срока службы лампы (вплоть до нуля).

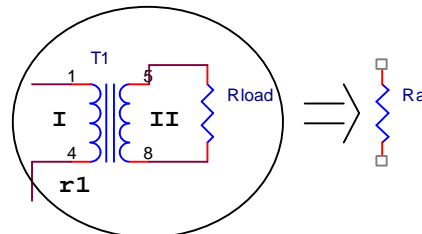
Поэтому рабочая точка (показана на рисунке желтым квадратиком) должна лежать ниже и левее этих «ограничителей». Но надо учесть, что для многих (особенно военных) ламп, данные приведены для получения максимально возможного срока службы и максимальной надежности, а также некоторой долей перестраховки. В радиолюбительских условиях, в ряде случаев допустимо превышение какого-то параметра (но не всех сразу!), поскольку не ракету строим, а в некоторых случаях на это идут специально и нерадиолюбители (например в специальных «гитарных» усилителях, часто используют лампы при более высоком анодном напряжении).

В общем, по ВАХ лампы можно всё определить, но (!) – те кто мог бы это сделать самостоятельно, вряд ли стали бы читать то что я тут пишу. Остальные скорее всего прочитают где-нибудь в книжке или интернете (или спросят сами на каком-нибудь форуме: «а какой надо режим для этой лампы?») В результате получают U_{ac} , I_a , U_c и R_i , после чего можно будет двигаться дальше.

Сначала разберемся с трансформатором. Больше всего нас интересует его коэффициент трансформации. Не вдаваясь в подробности «высокой электротехники» - трансформатор, с подключенной ко вторичной обмотке нагрузкой (R_{load}) можно представить в виде одного резистора (R_a), сопротивление которого равно сопротивлению нагрузки, умноженному на коэффициент трансформации в квадрате:

$$R_a = R_{load} * K_{tr}^2,$$

и это будет анодной нагрузкой лампы по переменному току.



По постоянному току, нагрузкой будет активное сопротивление первичной обмотки (r_1).

Правило второе – выбор нагрузки это ВАШЕ ЛИЧНОЕ ДЕЛО! Он не связан непосредственно с режимом работы лампы по постоянному току. И если с r_1 все просто (чем меньше тем лучше - если r_1 меньше 20% от R_i это допустимо, меньше 10% - отлично, меньше 5% - так хорошо просто не бывает!), то с R_a ситуация сложнее. Важным является т.н. «альфа», или просто соотношение R_a/R_i .

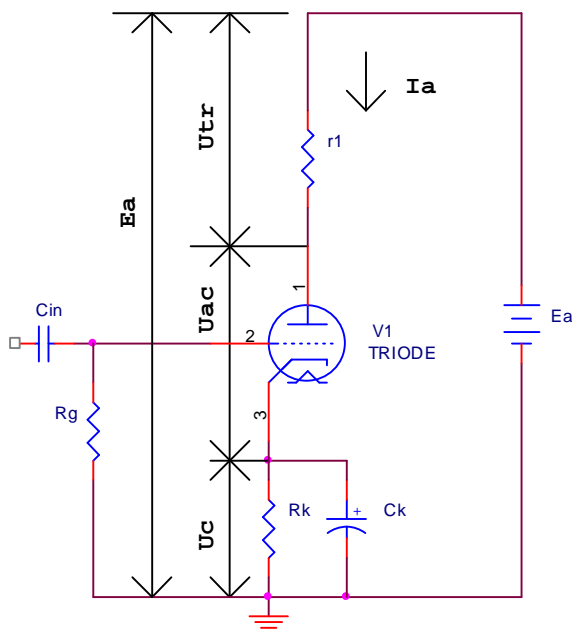
На R_i мы можем (в небольших пределах) повлиять выбором рабочей точки, но в общем, для конкретной лампы это более-менее известная величина. Следовательно, нужно задаться сопротивлением нагрузки (обычно 4 или 8 ом), выбрать альфу (A), по ней посчитать R_a , по R_a посчитать K_{tr} , по которому уже рассчитывать трансформатор (расчет трансформатора – другая тема, и мы ее тут касаться не будем) :

$$R_a = A * R_i$$

$$K_{tr} = \sqrt{R_a/R_{load}}$$

А вот выбор самой альфы – это вопрос отдельный. По нему чуть-ли не романы слагают и ругаются постоянно. Дело в том, что по мере роста альфы, снижаются искажения, снижается выходное сопротивление, но вот выходная мощность – сначала растет, а затем тоже снижается. Т.е. существует максимум (в районе альфа=2) выходной мощности, но остальные параметры при этом, как правило, неприменимы. Поэтому общепринятая рекомендация – выбирать альфу от 3 до 5, при этом мощность еще не так упадет, зато искажения снизятся. С ростом же альфы больше 5-7, искажения уже мало уменьшаются, но мощность продолжает падать. К счастью, при этом одновременно снижается и выходное сопротивление, т.е. меньше теряется в самом усилителе, становится лучше демпфирование динамиков и прочее. Альфа 10 и выше – это уже экстремизм. Для «чайников» вполне достаточно принять для начала альфу 3-5.

Как было уже сказано выше, для постоянного тока трансформатор можно заменить резистором, равным r_1 :



Здесь:

E_a – напряжение анодного питания.

I_a – ток анода (в рабочей точке).

U_{tr} – падение напряжения на первичной обмотке трансформатора.

U_{ac} – напряжение анод-катод (в рабочей точке).

U_c – напряжение смещения.

Мы уже знаем рабочую точку, т.е. знаем I_a , U_{ac} , а также знаем или посмотрели на ВАХ требуемое напряжение смещения в этой точке – U_c (для рабочей точки на рисунке выше, $U_{ac}=200v$, $I_a=20mA$, $U_c=-8v$).

Воспользуемся нашим любимым законом Ома:

- падение напряжения на трансформаторе: $U_{tr}=I_a*r_1$,

- сопротивление катодного резистора: $R_k = U_c / I_a$, мощность на резисторе $P_k = U_c * I_a$, следует выбирать резистор, с допустимой мощностью хотя бы в 2-3 раза выше.

Нетрудно (наверное) догадаться, что требуемое напряжение анодного питания будет:

$$E_a = U_a + U_{ac} + U_{tr}.$$

Напомню – в случае фиксированного смещения, U_c не присутствует в катод лампы, и следовательно $E_a = U_{ac} + U_{tr}$.

Что нам осталось еще для расчета по постоянному току? Да в общем, ничего – C_k и C_{in} это уже расчет по переменному току, а R_g – выбирается исходя из нескольких соображений.

Правило третье – проверьте не указано ли в паспорте на лампу максимальное сопротивление сеточного резистора, и если оно указано – не превышайте его! Может быть указано две величины, меньшая – для фиксированного смещения, и большая – для автоматического. Проблема, по которой сопротивление сеточного резистора (или «сопротивление утечки» ограничено сверху – возможный саморазогрев лампы, нестабильность ее рабочей точки (особенно актуально для мощных ламп, например 6С33С).

Причин, по которым это сопротивление ограничено снизу две:

- образуется делитель из C_{in} и R_g . Сопротивление конденсатора растет с уменьшением частоты, поэтому чтобы небыло «завала по басу» с уменьшением R_g нужно увеличивать C_{in} .

- это сопротивление, является нагрузкой для предыдущего каскада (драйвера), и чем оно меньше - тем более мощный драйвер понадобится.

На практике, величина R_g может лежать от 100кОм для мощных ламп, до нескольких сотен килоом и даже мегаома для менее мощных. Для ламп со склонностью к саморазогреву, допустимая величина R_g может снижаться до 50к и ниже.

Расчет по переменному току.

Минимально необходимую величину C_{in} можно рассчитать, задавшись нижней рабочей частотой (F_{low} - частотой среза, или той, на которой образуется «завал» -3дБ). На практике обычно выбирают

$$C_{in} > 0.1 / (R_g * F_{low})$$

$$C_k > 2 / (R_k * F_{low})$$

(помните – подставляя сопротивление в омах и частоты в герцах, емкость конденсатора получаем в фарадах!)

Правило четвертое – ставьте конденсаторы максимального качества, и максимальной емкости, какие можете себе позволить, и которые влезут в корпус усилителя. Но без фанатизма (а то известны случаи, когда в катод ставили батарею конденсаторов, размером с сам усилитель).

Лучше всего, конечно, избавиться от этих конденсаторов совсем. Но если от C_k можно избавиться фиксированным смещением, то для избавления от C_{in} нужно использовать

трансформаторную или непосредственную связь между каскадами, п «это», как и полный расчет по переменному току, включая расчет частотных характеристик и гармоник – выходит за рамки данного повествования. Начните с этого, а дальше – читайте учебники и статьи, рекомендованные «для более продвинутых».

Подведем итог:

Мы знаем:	$U_{ac}, I_a, U_c, R_i.$
Мы выбираем:	альфу (A) и сопротивление нагрузки (Rload)
Мы ориентировочно полагаем	$r_l = 10-20\%$ от $R_i.$
Мы выбираем Rg по максимуму,	не более 1МОм или указанного в паспорте лампы.
Мы задаемся F_low:	не более 20-30гц, для High-End 5-10Гц.

Мы рассчитываем:

$$\begin{aligned}R_a &= A * R_i \\K_{tr} &= \text{SQRT}(R_a / R_{load}) \\R_k &= U_c / I_a, \\P_k &= U_c * I_a, \\C_k &> 2 / (R_k * F_{low}) \\C_{in} &> 0.1 / (R_g * F_{low}) \\U_{tr} &= I_a * r_l \\E_a &= U_a + U_{ac} + U_{tr}.\end{aligned}$$

Успехов.

Dixi.