

От однотакта - к двухтакту! (о забытом методе анализа и расчёта пушпулов)

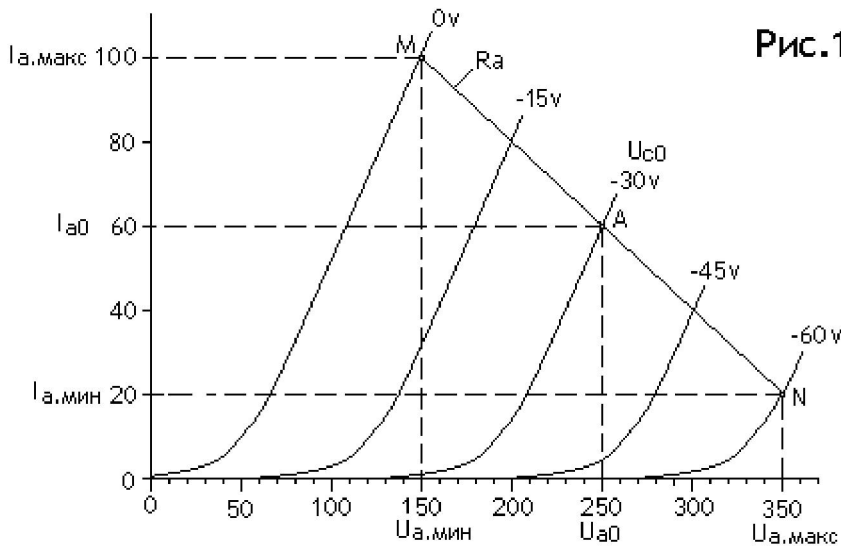
1. Традиционный метод.

На рис.1 представлен знакомый всем график расчёта *однотакта* в триоде.

Для рассмотрения взяты ВАХ абстрактного идеального триода. Идеальность заключается в том, что линии ВАХ эквидистантны, т.е. в "рабочей части" строго параллельны друг другу, и прямолинейны. Так проще рассматривать.

Чистейший режим класса **A**, ноль всех гармоник (!).

Из графика вычислены основные показатели: развиваемая в нагрузке мощность P и сопротивление нагрузки R_a .



$$R_a = (350 - 150) / (100 - 20) = 200 / 80 = 2,5 \text{ кОм}$$
$$P = 0,5 * (250 - 150) * (0,1 - 0,06) = 0,5 * 100 * 0,04 = 2 \text{ Вт}$$

Можно ли, пользуясь этим графиком, рассчитать **PP**-каскад класса **A** с такими же исходными данными?

Конечно, можно!

Имея этот график (теперь это будет уже *график для одного плеча PP*), можно вычислить те же основные параметры, но для пушпула:

$$P_{pp} = 2P = 2 * 2 = 4 \text{ Вт};$$
$$R_{aa} = 2R_a = 2 * 2,5 = 5 \text{ кОм}.$$

Знатоки теории трансформатора сразу могут задать вопрос: почему $2 * R_a$? Ведь известно, что трансформатор преобразует сопротивления пропорционально **КВАДРАТУ** коэффициента трансформации!, Если мы удваиваем витки первички, должен быть множитель **4** ! Ответ прост: это просто МЕТОД такой. Упрощённый. Чтобы легче было вести расчёт, не строить на графике ИСТИННУЮ линию нагрузки, и вести расчёт PP по образцу однотакта.

Именно такой метод расчёта PP и применяют участники форумов, им воспользовался АМЛ в статье про апгрейд "Прибоя", его даже Цыкин приводит в своих книгах в качестве примера расчёта PP-A. Этот же метод заложен во множество расчётных программ и симуляторов.

Я называю этот метод "традиционным", или "через однотакт".

Его недостаток в том, что при переходе к реальным лампам, с неидеальными ВАХ, да ещё в режиме АВ, страдает точность вычислений. Но не это самое главное. Дело в том, что этот график не даёт полного представления о работе PP. Участники форумов, вооружённые только этой картинкой, часто вступают в споры по поводу работы двухтакта.

Этот традиционный метод предназначен для расчёта. И только.

По просьбе коллег, участников форума **"Hi-End по-русски"**, я попытаюсь здесь изложить метод анализа и расчёта двухтакта, который применяли "классики", авторы древних книг.

2. Классический анализ работы РР.

Для анализа распределения токов в двухтакте, "классики" строили специальный график. Для примера и сравнения используем график рис.1.

Берём второй такой же график, поворачиваем его на 180 градусов (лампы работают в противофазе!) и совмещаем с первым так, чтобы их оси анодных напряжений совместились, и также совместились точки на этих осях, соответствующие напряжениям U_{a0} обоих графиков.

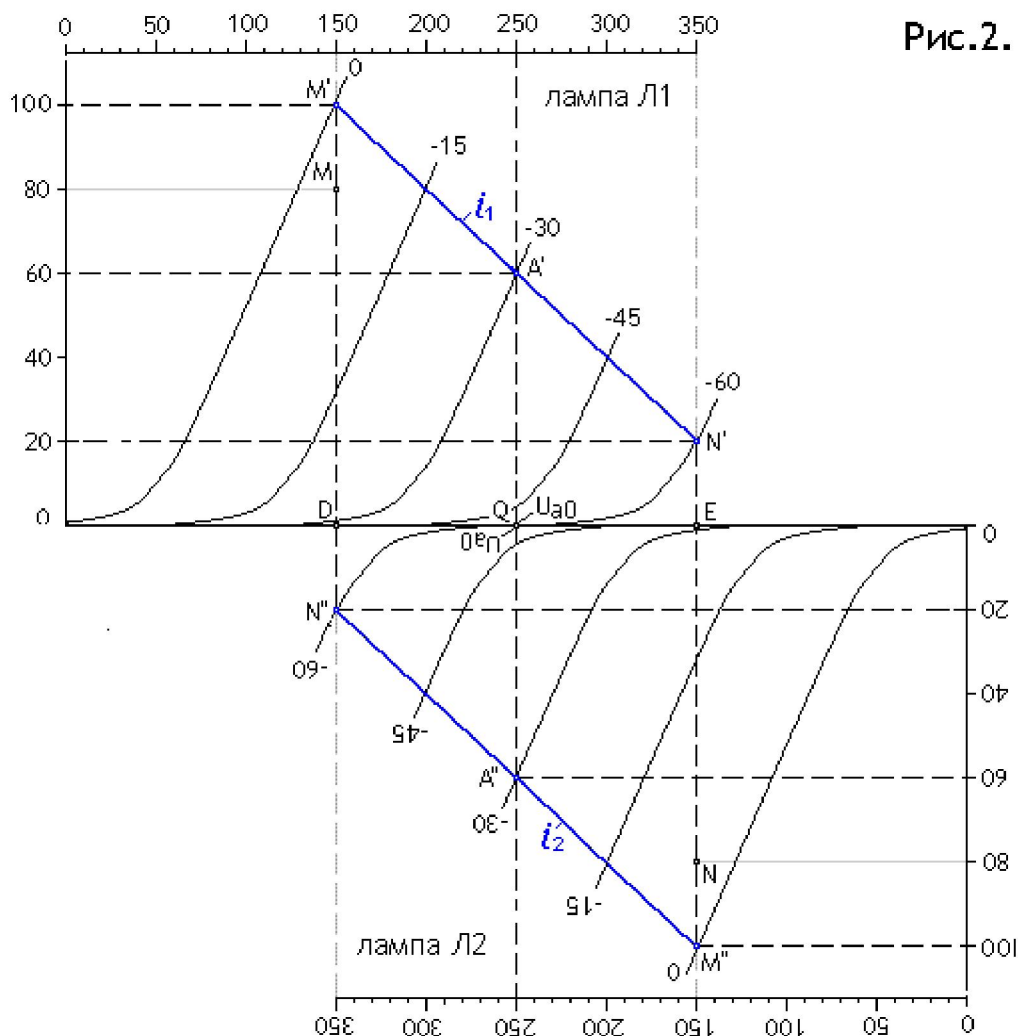


Рис.2.

Линии $M'N'$ и $M''N''$ - линии изменения анодных токов ламп.

Но нас интересует переменная составляющая тока в первичке выходника, которая и трансформируется в нагруженную вторичку.

Опять же по "классикам", через всю первичку протекает ток сигнала, мгновенные значения которого равны *разности* мгновенных значений анодных токов плеч двухтакта:

$$i_a = i_1 - i_2, \quad (1)$$

где i_a – *разностный* ток.

Найдём точки на совместном графике, через которые пройдёт линия *разностного* тока.

1. Точка покоя. Через каждое плечо в режиме покоя идёт постоянный ток, в нашем случае $I_{a0} = 60$ мА. Но так как обмотки относительно источника питания включены встречно, разность

этих двух токов равна нулю, следовательно, подмагничивание сердечника выходника постоянным током отсутствует. Напряжения на анодах при этом равны: $U_a = U_{a0} = 250$ В. На совместном графике это точка Q.

Понятно, что через точку Q линия разностного тока будет проходить также и при равенстве мгновенных значений анодного тока.

2. Предположим, на сетки ламп от фазоинвертора подан сигнал амплитудой 30 В: на сетку лампы Л1 +30В, на сетку лампы Л2 -30В. На сетке Л1 напряжение стало равно 0В, рабочая точка сместилась в точку M', мгновенное значение тока анода стало равно 100 мА. В этот же момент напряжение на сетке Л2 стало равно -60В, мгновенное значение тока анода стало равно 20 мА. Поскольку разностный ток в этот момент стал равен $100 - 20 = 80$ мА, то мы получим точку M на графике, которая и покажет значение тока i_d .

3. Если сменить фазу подаваемого на сетки напряжения, то на сетку Л1 поступит -60В, а на сетку Л2 в этот же момент поступит 0В. Анодный ток лампы Л2 станет равным 100 мА, лампы Л1 20 мА, разностный ток станет равным те же 80 мА, но ток через первичку пойдёт в противоположном направлении. Получим точку N.

Имея три характерные точки, можно провести прямую MQN, которая и покажет нам изменения тока сигнала в первичке. **MQN – истинная линия нагрузки в РР.**

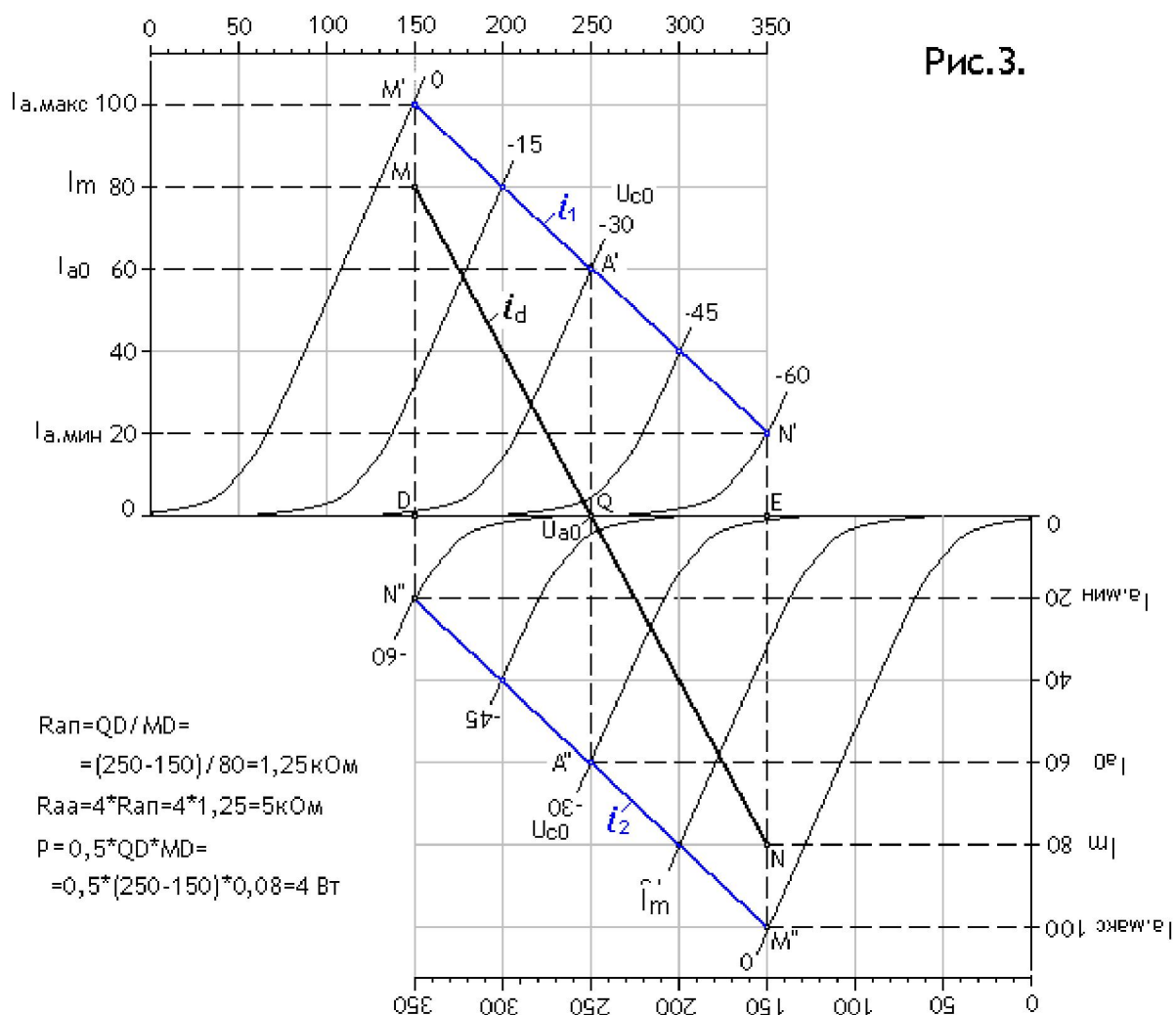


Рис.3.

На рис.2 добавлены также все необходимые обозначения и проведено вычисление R_{aa} и выходной мощности P.

Точно так же можно построить и промежуточные точки при U_{c1} , равных -15 и -45 В.

Поскольку составной график полностью симметричен, то для расчёта можно пользоваться только верхней его половиной. Так и проведём дальнейшее рассмотрение.

3. Реальный триод.

На рис.4 представлен типовой график расчёта на лампе 6L6 в триодном включении, который применяют обычно и для расчёта SE, и для расчёта PP.

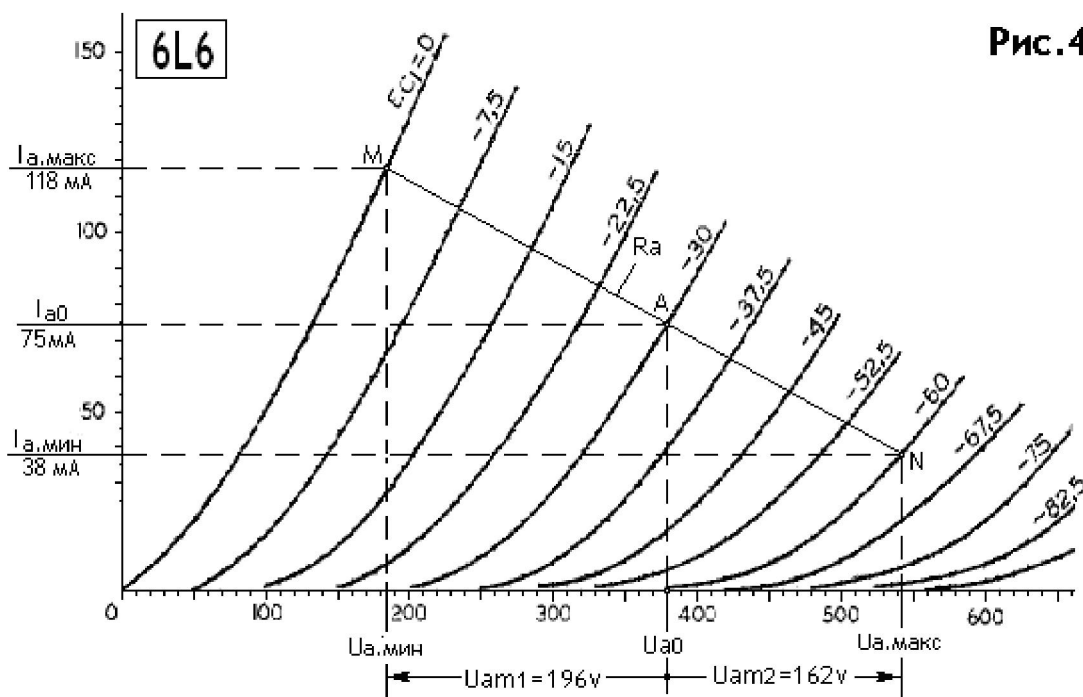


Рис.4.

Если этот график использовать для расчёта PP, то по формулам “традиционного” метода получим такие результаты:

$$R_{aa} = 2 * R_a = 2 * 4,45 = 8,9 \text{ кОм}$$

$$P_{pp} = 0,25 * (U_{a.макс} - U_{a.мин}) * (I_{a.макс} - I_{a.мин}) = 0,25 * (540 - 184) * (0,118 - 0,08) = 7,12 \text{ Вт.}$$

Из рис.4 очевидно, что длины отрезков MA и AN расчётной прямой не равны, амплитуда напряжения на первичной обмотке разная для полувольт сигнала: левая полуволна имеет амплитуду $U_{ам1} = 196 \text{ В}$, правая – $U_{ам2} = 162 \text{ В}$. Это значит, что *среднее* значение напряжения сигнала на первичке (не путать с среднеквадратичным) не равно нулю, как должно быть при идеальной синусоиде. Это чревато появлению искажений сигнала.

Классический метод рассматривает подробно это явление, и показывает способ устранения указанного недостатка.

Рассмотрим рис.5.

Чтобы амплитуды обоих полувольт напряжения на нагрузке были одинаковыми, необходимо выбрать большее напряжение смещения на сетках ламп, в данном случае, увеличить от -30 до -33,75 В.

При этом точка покоя A' переместится вниз по вертикали A'Q до линии BAX, соответствующей $U_c = -33,75 \text{ В}$, а прямая M'N' удлинится вправо до линии BAX $U_c = 2U_{см} = 2 * (-33,75) = -67,5 \text{ В}$.

Линия анодного тока лампы M'A'N' приобретёт вид кривой. Классический анализ показывает, что эта кривая близка к квадратичной параболе.

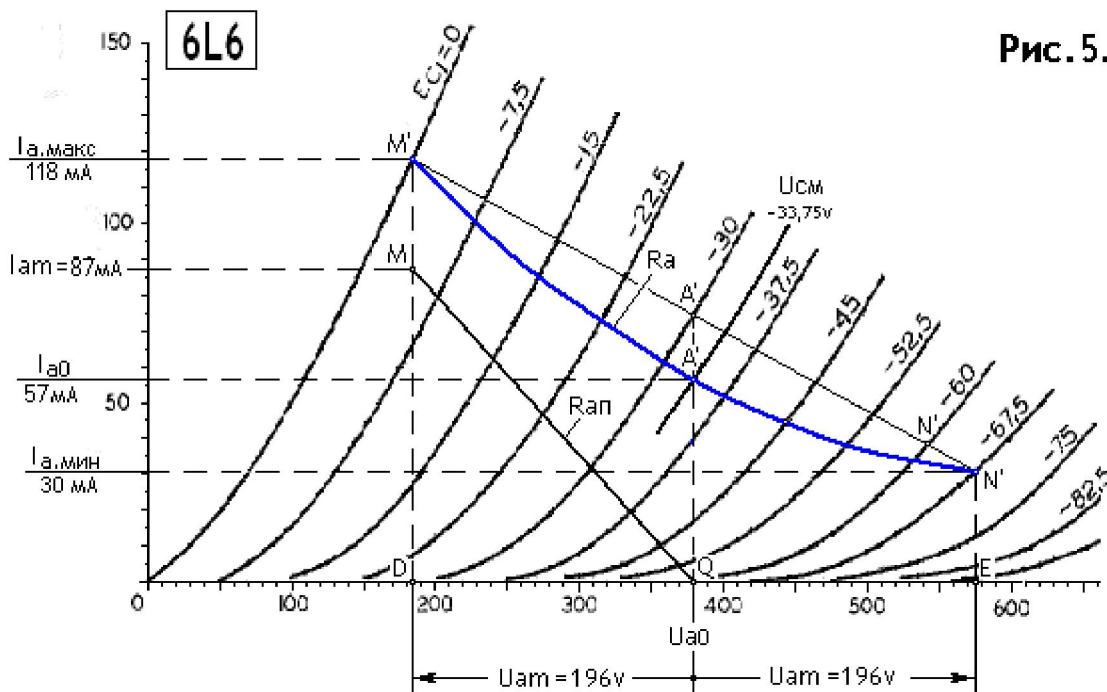


Рис. 5.

Проведём линию разностного тока MQ, и определим сопротивление нагрузки плеча разностному току и развиваемую каскадом мощность сигнала в первичке:

$$R_{ап} = QD/MD = 196/87 = 2,25 \text{ кОм}$$

$$R_{аа} = 4 * R_{ап} = 4 * 2,25 = 9 \text{ кОм}$$

$$P = 0,5 * QD * MD = 0,5 * 196 * 0,087 = 8,53 \text{ Вт.}$$

По точкам M', A' и N' методом трёх ординат [Л., стр.92] определим среднее значение тока анода одного плеча каскада при полном размахе:

$$I_{а.ср.п} = (I_{а.макс} + 2 * I_{а0} + I_{а.мин}) / 4 = (118 + 2 * 57 + 30) / 4 = 65,5 \text{ мА.}$$

Напомню, что именно этот ток потребляет плечо двухтакта от источника анодного питания! Соответственно, ток, потребляемый всем каскадом при полном размахе будет равен:

$$I_{потр} = I_{а.ср} = 2 * I_{а.ср.п} = 2 * 65,5 = 131 \text{ мА.}$$

Вывод:

Чтобы избежать вызванных неидеальностью ВАХ искажений “полезного” разностного тока в нагрузке, требуется прямую линию тока через лампу заменить кривой. При этом ток через каждую из ламп становится ещё более искажённым, но разность токов двух плеч даёт линейное изменение тока в нагрузке.

Дополнение1. Построение кривой анодного тока по пяти точкам.

Трёх точек для построения кривой для анализа и расчёта часто бывает недостаточно, особенно, если кривая анодного тока имеет более сложную форму, что характерно для PP-A с меньшим значением тока покоя Ia0, и для PP-AB.

Рассмотрим рис.6. Это тот же предыдущий рисунок, который мы дополним.

Порядок построения:

- а) строим дополнительные ВАХ, соответствующие 0,5Ucm и 1,5 Ucm.
- б) из середины отрезка QE проводим вертикаль до пересечения с ВАХ, соответствующей 1,5Ucm. Получаем отрезок прямой, который на графике изображён красным цветом. Верхняя точка этого отрезка – одна из искомых точек.

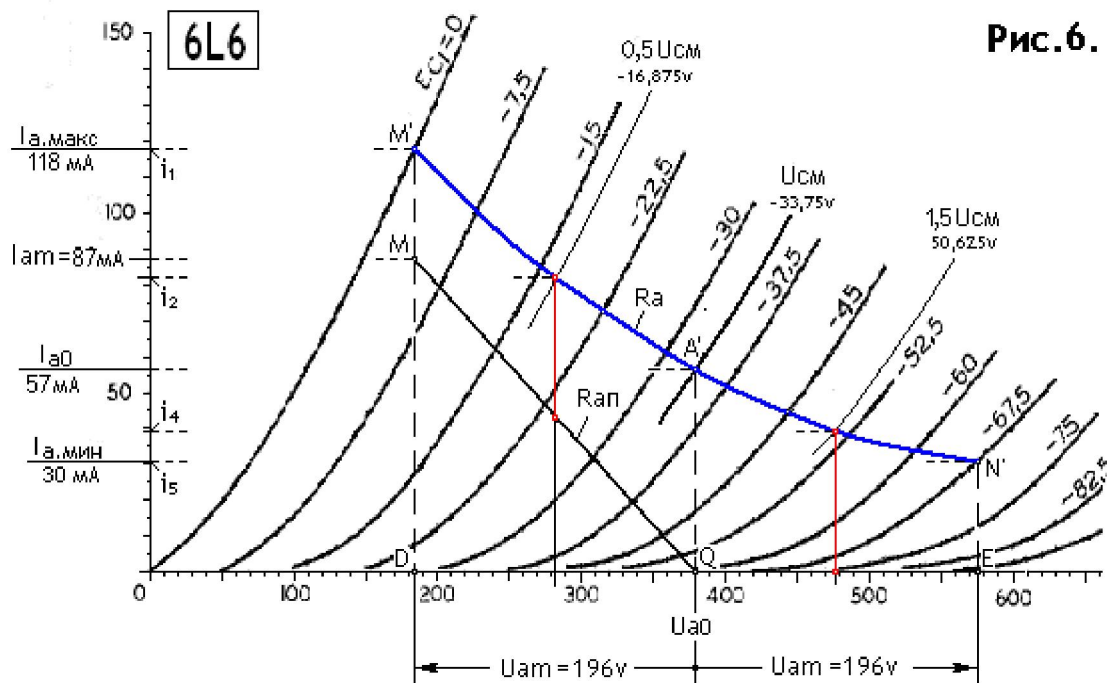


Рис. 6.

в) из середины отрезка DQ проводим вертикаль до пересечения с линией MQ. На точку пересечения “ставим” отрезок красного цвета, полученный в п.(б). Верхний его конец даст вторую искомую точку: он должен точно попасть на линию ВАХ, соответствующую $0,5 U_{сМ}$. Если не попадает, уточните построение, где-то была погрешность, возможно, исходный график семейства ВАХ на скане был перекошен.

г) через полученные точки проводим кривую анодного тока. Отметим на оси ординат токи в этих точках.

Теперь можно уточнить значение тока $I_{a.c.p.п}$, полученное ранее методом трёх ординат, проведя расчёт методом *пяти ординат* [Л., стр.93]:

$$I_{a.c.p.п} = (i_1 + 2i_2 + 2i_4 + i_5) / 6 = (118 + 2 \cdot 82 + 2 \cdot 38 + 30) / 6 = 64,7 \text{ мА}$$

Соответственно, среднее значение тока анода всего РР-каскада:

$$I_{a.c.p} = 2 \cdot I_{a.c.p.п} = 2 \cdot 64,7 = 129,4 \text{ мА.}$$

Как видим, в данном примере среднее значение тока анода, рассчитанного по трём и по пяти ординатам, практически одно и то же.

Дополнение 2. Двухтакт в классе АВ и В.

Этот вопрос рассмотрен в статье “Кое-что о двухтакте”.
Статья находится здесь: <http://valvelab.pochta.ru/index.htm>

ЛИТЕРАТУРА.

Войшвилло Г.В. “Усилители НЧ на электронных лампах”, изд. 2-е, 1963 г.

Леонид Пермяк.
Июль 2011г.