

Электроакустика

(По материалам статей в журналах «Радио», «Салон AV», «Суфлёр» и др. с дополнениями)

Прежде всего, напомним читателям об основных особенностях использования ламп в усилителях ЗЧ. Известны три схемы их включения: с общим катодом

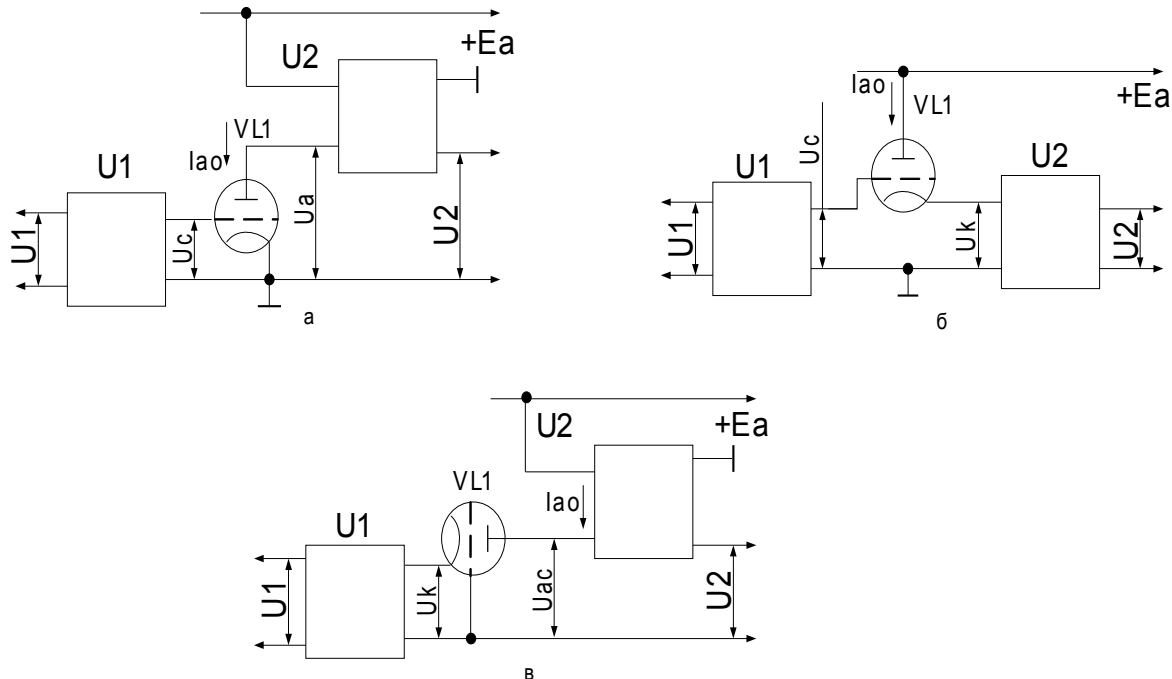


Рис1

а), с общим анодом (Рис. 1,б) и общей сеткой (Рис. 1,в). Четырехполюсниками U1 и U2 условно обозначены входные и выходные цепи каждого из показанных на рис. 1 каскадов. Причем четырехполюсники должны быть построены таким образом, чтобы через анодные цепи ламп мог протекать постоянный ток, а на сетку относительно катода можно было бы подать необходимое постоянное напряжение смещения.

Наибольшее распространение получил усилительный каскад, построенный по схеме с общим катодом. В простейшем виде он показан на Рис.2.

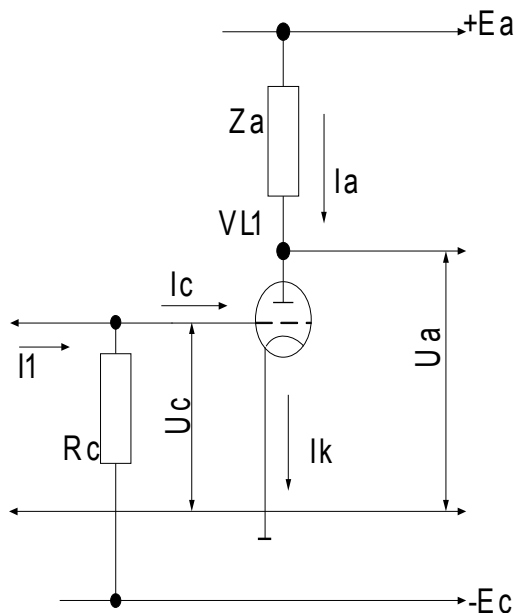
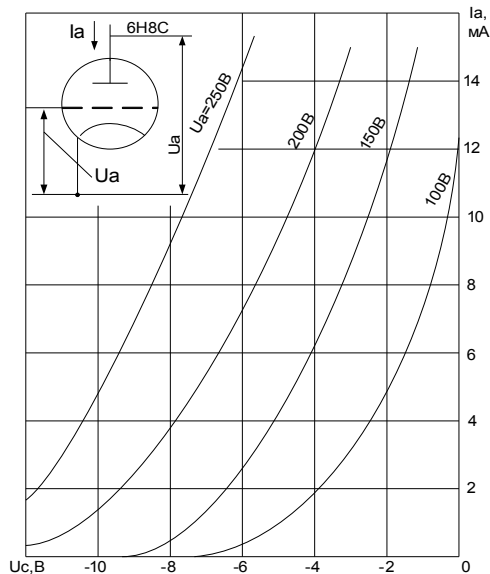
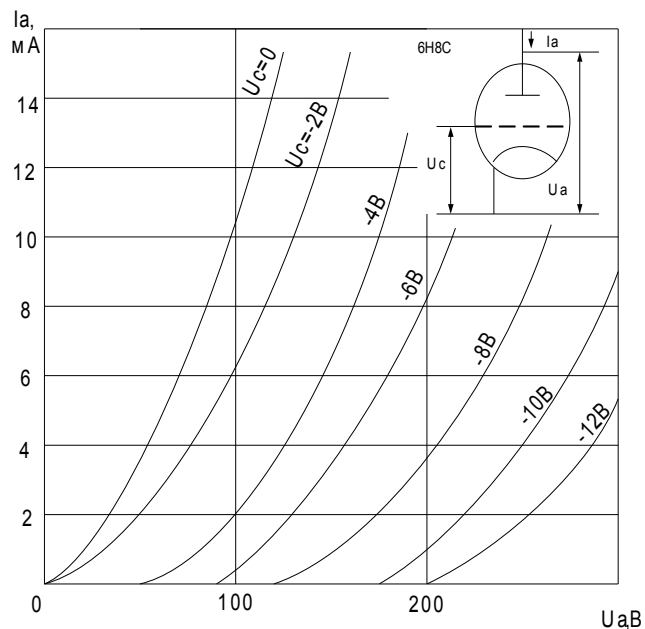


Рис2

Известно, что свойства лампы, как элемента электрической схемы, определяются зависимостями между токами и напряжениями в цепях ее электродов. При расчете ламповых усилителей принято пользоваться статическими анодно–сеточными характеристиками: $I_a=f(U_c)$ при $U_a=const$ и $I_a=f(U_a)$ при $U_c=const$. Семейства этих характеристик взаимосвязаны, так что имея одни из них, можно построить другие. Примеры таких характеристик триода и пентода показаны соответственно на Рис. 3 и 4.

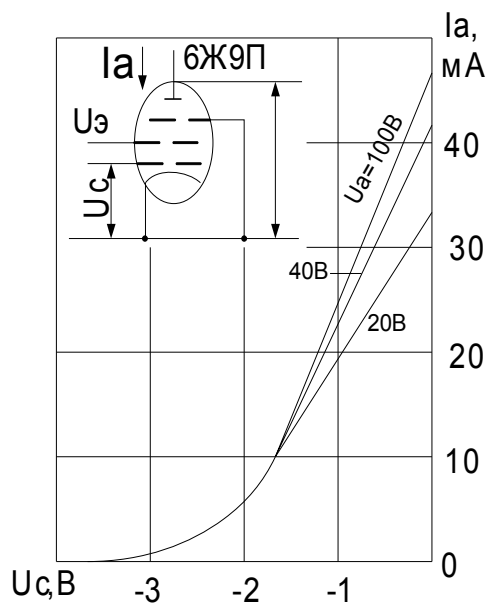


а

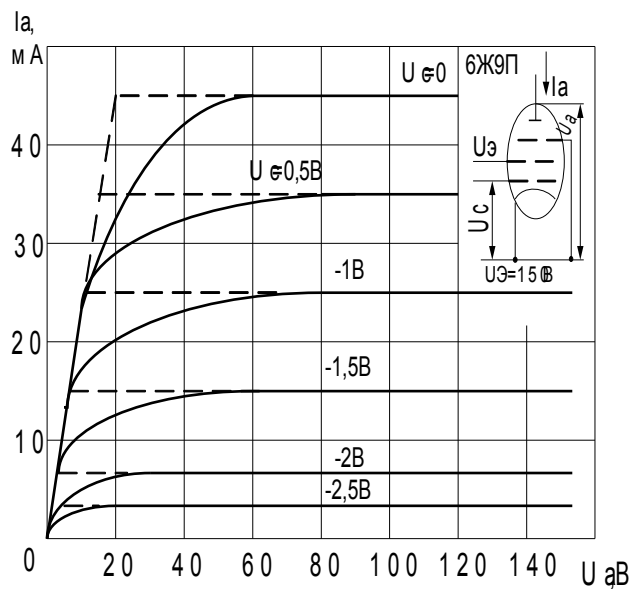


б

Рис.3



а



б

Рис4

Основные параметры лампы легко установить по статическим характеристикам. Коэффициент усиления определяют как отношение приращения напряжения на аноде к приращению напряжения на сетке при постоянном анодном токе: $\mu = \Delta U_a / \Delta U_c$ при $I_a=const$.

Внутреннее сопротивление определяется как отношение приращения напряжения на аноде к приращению тока анода при постоянном напряжении на сетке: $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$ при $U_c=const$.

Крутизна лампы представляет собой отношение приращения тока анода к приращению напряжения на сетке при постоянном напряжении на аноде: $S = \Delta I_a / \Delta U_c$ при $U_a = \text{const}$.

Теперь о работе ламп в реальном усилительном каскаде. Условно различают три режима: А, В и С. В режиме А начальное положение рабочей точки выбирают таким, чтобы при реальной амплитуде сигнала она перемещалась в пределах линейного участка сеточной характеристики лампы. В режиме В рабочая точка находится у нижнего сгиба этой характеристики, а в режиме С – левее сгиба. В результате в двух последних режимах лампа работает как нелинейный элемент.

Начальный режим работы лампы задается напряжениями источников питания цепей ее электродов за вычетом падений постоянных напряжений на элементах этих цепей. Падения напряжений в токи в цепях электродов легко найти, пользуясь характеристиками лампы.

Мы не будем останавливаться на основных особенностях работы лампы в каскаде линейного усилителя и не станем проводить основные расчетные формулы для той или иной схемы ее включения, отошлем читателя к литературе [1,2]. Отметим только, что свойства ламповых усилительных каскадов, по сути, эквивалентны свойствам аналогичных каскадов на транзисторах. Однако есть и отличия.

Во-первых, крутизна лампы от температуры анода (в разумных пределах) не зависит, коэффициент же передачи тока транзисторов $h_{21э}$ изменяется не только от изменения температуры, но и от тока коллектора Рис. 5.

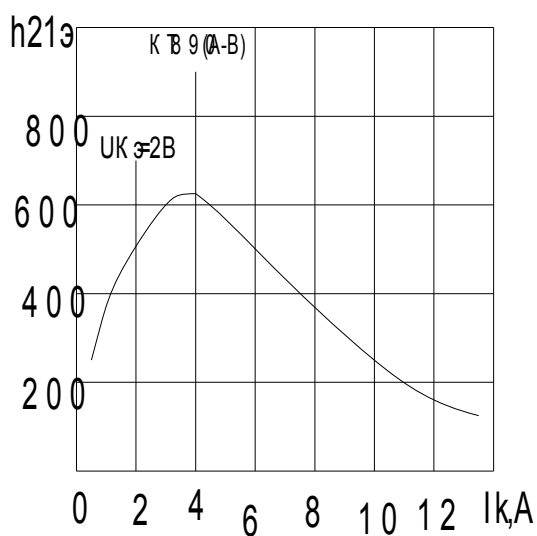
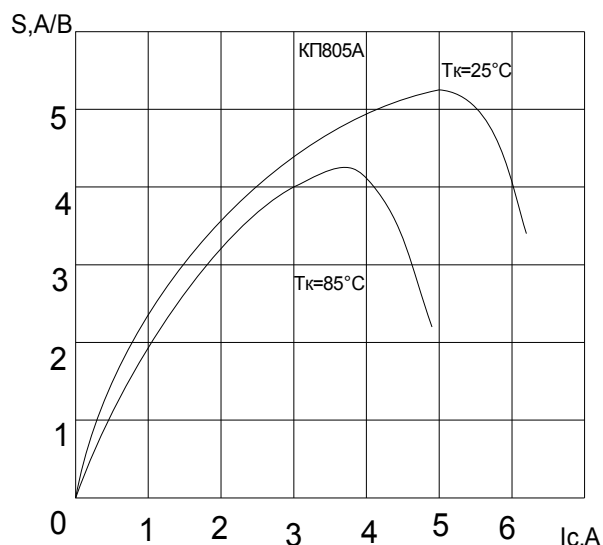


Рис 5 а



б

Эти процессы взаимно усугубляют друг друга. В нашем случае это выразится в компрессии усиливаемого сигнала. В ламповых каскадах ситуация прямо противоположная Рис.6.

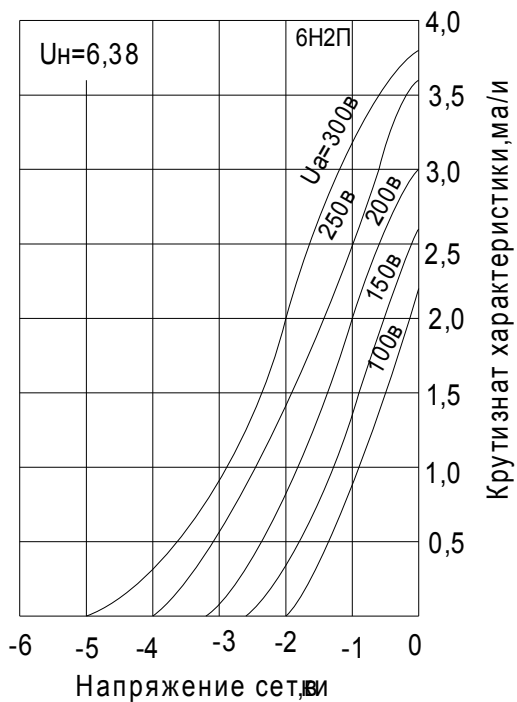
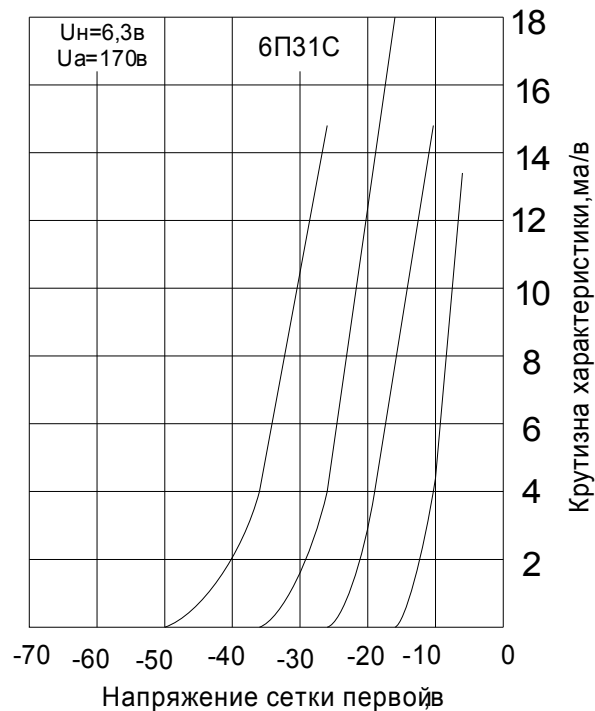


Рис. 6 а

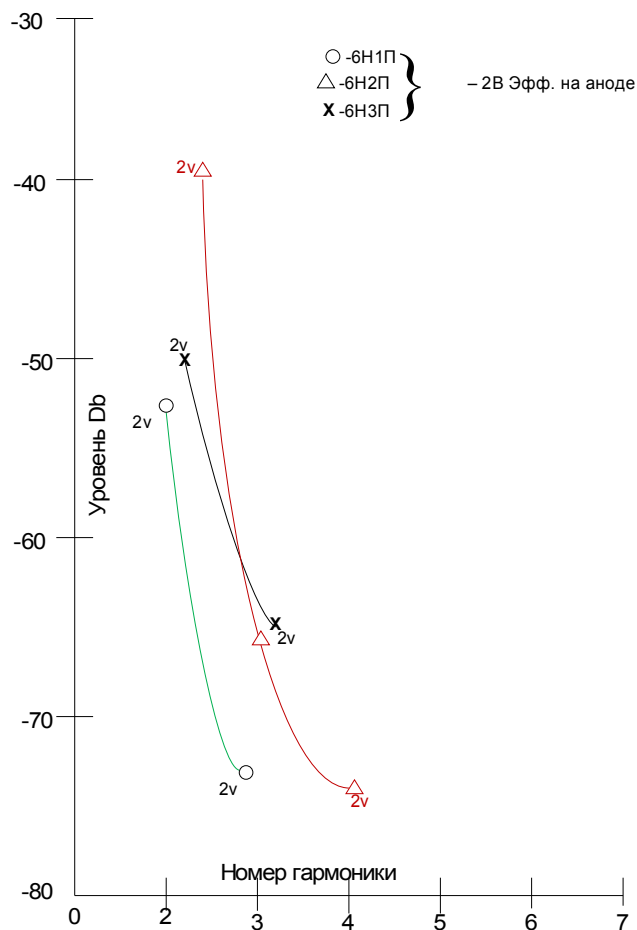


б

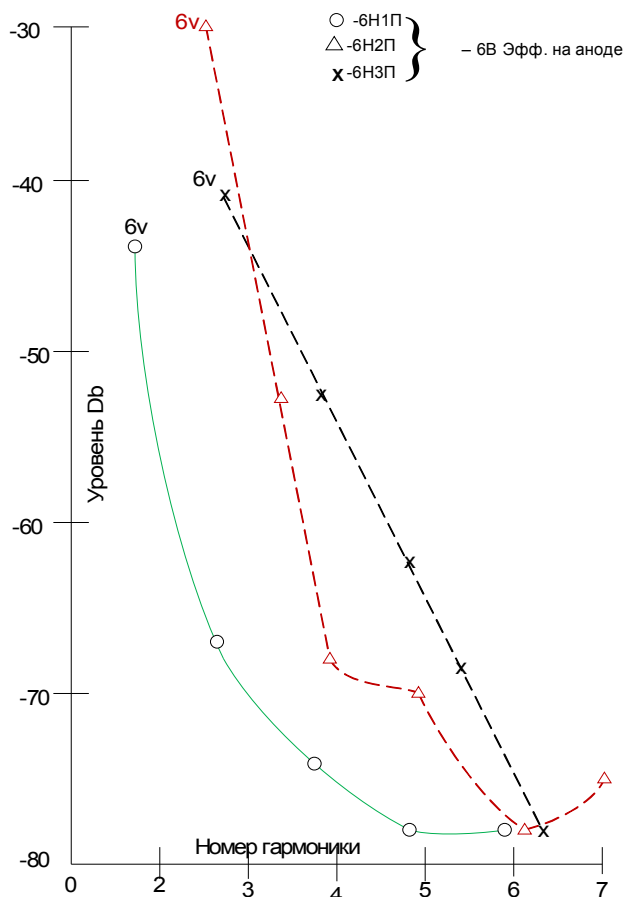
Существующее заблуждение относительно «слабого баса» в ламповых усилителях связано, на наш взгляд, с недостаточной мощностью выходных трансформаторов и трансформаторов питания. Опираясь на наш опыт могу сказать следующее, получить от транзисторного усилителя «бас» эквивалентный ламповому – невозможно.

Во-вторых, лампы, в отличие от транзисторов, управляются напряжением, а не током. Это позволяет разгрузить предыдущий каскад в ламповых усилителях и соответственно уменьшить вносимую им нелинейность. Не следует, конечно, забывать о входной емкости последующего каскада, которая может быть достаточно высокой. Так, в каскаде на лампе 6Н2П ее величина при максимальном коэффициенте усиления составляет около 73 пФ, но для зарядки такой емкости требуется значительно меньший ток, чем ток управления транзисторным каскадом.

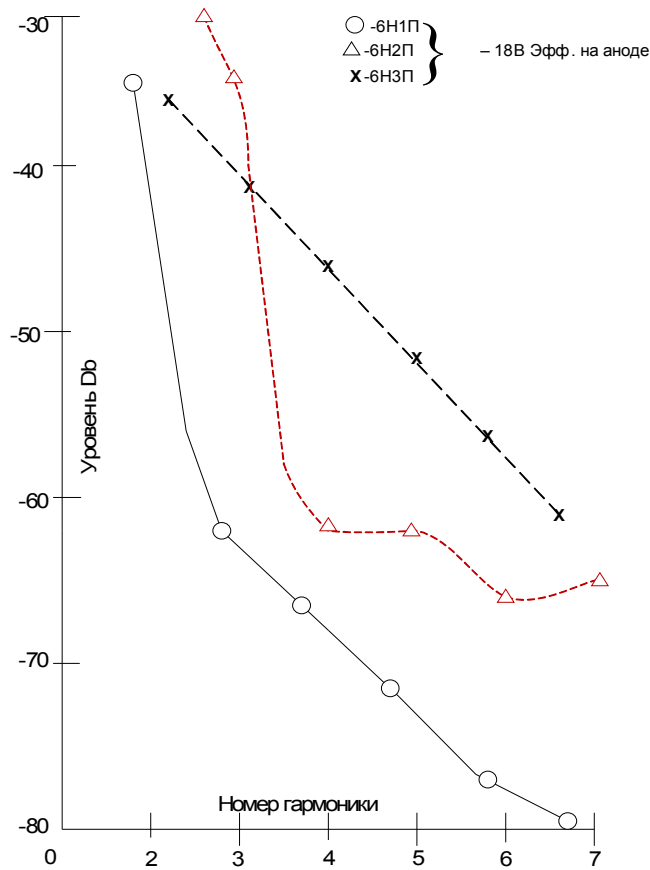
В-третьих, лампы более индивидуальны, чем транзисторы, по вносимым в сигнал нелинейным искажениям. В качестве примера приведём следующие рисунки 7÷11:



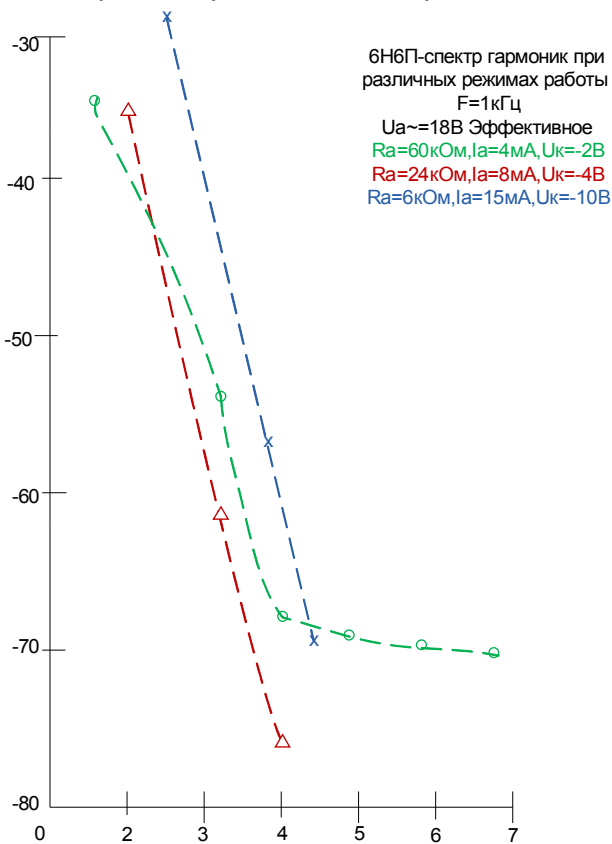
На Рис. 7 приведён спектр искажений трёх ламп при выходном сигнале равном 2В.



На рис. 8 приведён спектр искажений тех же ламп но при выходном сигнале 6В.



На рис. 9 приведён спектр искажений тех же ламп но при выходном сигнале 18В.



На Рис. 10 приведён спектр искажений лампы 6Н6П при различных режимах каскада.

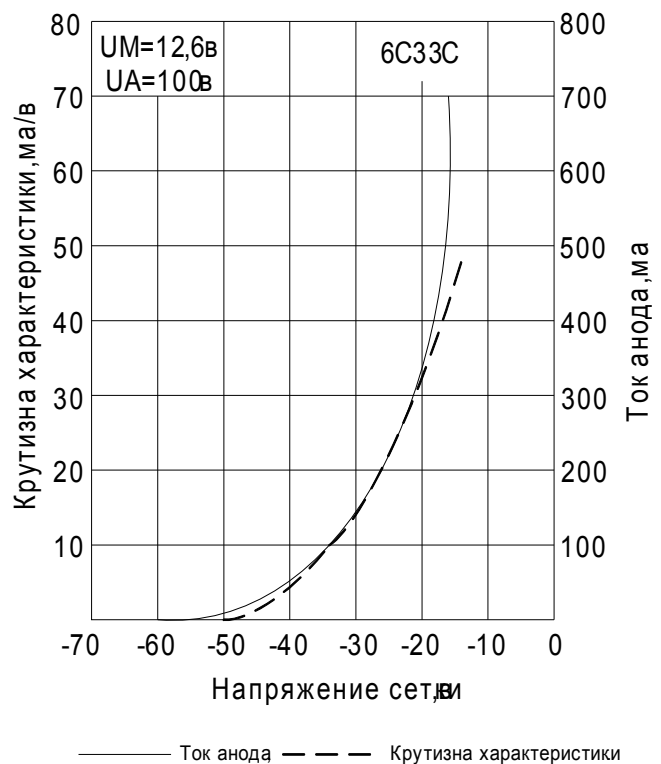


Рис. 11

Легко видеть насколько индивидуальны разные лампы и даже одна и та же, но в разных режимах работы. Все разговоры о простой замене ламп и сделанные на этих основаниях выводы – беспочвенны. Только тщательный отбор и оптимизация режимов позволят сделать правильный вывод о применимости разных ламп в различных каскадах.

Теперь поговорим о факторах, влияющих на качество звучания, обеспечиваемое выходными каскадами усилителей на электронных лампах. Так как выходной каскад работает при размахе сигнала на аноде выходной лампы достигающем удвоенного напряжения питания и предельных для выбранной лампы токах, то мы можем представить усилитель эквивалентной схемой приведенной на Рис.12

На рис. 11, где R_i – внутреннее сопротивление источника анодного питания, R_n – сопротивление нагрузки усилителя, A – выходной каскад усилителя ЗЧ. Как видно из приведенной эквивалентной схемы выходной каскад является простым регулятором, изменяющим величину тока, протекающего из источника питания в нагрузку.

Начнем с источника питания, поскольку, как показывает практика, от него в значительной мере зависит работа любого усилительного устройства. Если допустить, что выходной каскад является абсолютно линейным и частотно независимым элементом схемы, то легко видеть, что нам необходимо сохранить стабильную величину R_i во всем диапазоне токов потребляемых выходным каскадом и в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц. В противном случае возникающая амплитудная модуляция, в связи с падением напряжения питания на R_i , исказит усиливаемый сигнал. Так как источник питания состоит из трех основных элементов: трансформатор, выпрямитель и фильтр, рассмотрим их влияние на изменение R_i .

Сетевой ввод должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- иметь сечение сетевого шнура из расчета не менее 2,5А/мм, лучше 1–2, чтобы не вызывать падение напряжения на проводах;

- сетевая проводка в квартире должна быть выполнена из медного провода, так как в случае алюминиевого провода повышается уровень помех из-за пленки окисла, что приводит к увеличению сопротивления монтажных соединений сетевой проводки и как следствие к возникновению «щелчков» при включении реактивных нагрузок /холодильник, кофемолка/. Повышенная чувствительность к подобным помехам ламповых усилителей определяется высоким напряжением питания достигающем сотен вольт при уровне сигнала 0,7В.

- усилитель должен содержать фильтр для подавления высокочастотных /радиочастотных/ помех. Это не спасает от «щелчков», но помогает, если вблизи находятся источники с мощным радиоизлучением.

На сетевом трансформаторе нужно остановиться особо, так как это один из трех основных узлов, определяющих качество звучания. Именно в нем мы должны подавить основные помехи, поступающие через сетевой ввод. Надо стремиться к такой конструкции силового трансформатора, что бы напряжение между корпусом усилителя и землей /батарея центрального отопления/, измеренное высоко Омным вольтметром, было порядка 110В. Это характеризует симметрию сетевого трансформатора относительно истинной «земли» и как следствие максимальное подавление помех поступающих через сетевой ввод.

Сердечники сетевых трансформаторов можно разделить на два типа: на Ш-образных пластинах, сюда можно отнести также витые сердечники типа ШЛ и тороидальные. Сердечники типа ПЛ занимают промежуточное положение между Ш-образными и тороидальными по своим свойствам.

Самыми распространенными являются Ш и ШЛ – это наиболее дешевые и технологичные, но обладающие большими полями и индуктивностями рассеяния. На этих сердечниках очень трудно добиться симметрии относительно земли и, как следствие, подавления «щелчков». В этом случае может помочь изменение полярности включения вилки усилителя в сетевую розетку.

Применение тороидальных сердечников упрощает решение этих задач, но приводит к росту пускового тока. В качестве примера можно привести такой случай: трансформатор мощностью 700 Вт имел импульс пускового тока величиной порядка 100. А, что соответствовало $100 \text{ A} \cdot 200 \text{ В} = 22000 \text{ Вт}$ мгновенной мощности.

Следующий этап – это выбор сечения сердечника и расположения обмоток. Опыт показывает, что также, как и в выходном трансформаторе надо стремиться к минимизации индуктивности рассеяния и собственной емкости трансформатора, особое внимание необходимо уделить изоляции, экранировке и расположению сетевой обмотки, так как любые паразитные связи приводят к проникновению в усилитель помех из сети. Выбирая сечение сердечника и диаметр проводов необходимо учитывать, что импульс тока потребляемый из вторичной обмотки выпрямителем собранным по мостовой схеме может достигать трехкратной величины выпрямленного тока. Приведенные рассуждения и опыт разработки показывают, что реальный сетевой трансформатор должен иметь двух–трехкратный запас по сечению стали и меди относительно общепринятых методик расчета.

В последнее время стало модным использовать в качестве выпрямителей кенотроны вместо кремниевых диодов. Да, за счет более плавной вольт–амперной характеристики импульс тока кенотрона имеет более плавный фронт и как следствие более узкий спектр, что облегчает фильтрацию по сравнению выпрямителями использующими кремниевые диоды, но используя высококачественный фильтр и оптимизируя топологию монтажа, можно без затруднений реализовать преимущества кремниевых диодов, заключающиеся в меньших габаритах, больших токах и отсутствии накала. Прделанная работа положительно скажется и на помехоустойчивости усилителя. При правильно сделанном выпрямителе преимуществ у кенотрона в качестве звучания нет.

Вторым основным элементом усилителя является фильтр и дело не столько в коэффициенте пульсаций выпрямленного напряжения, а в стабильности R_i во всем диапазоне токов и частот. Что толку иметь многократный запас по пульсациям, если R_i на частоте 10 кГц возрастет на порядок и тем самым разрушит пространственную локализацию в самых тонких нюансах вторичного звукового образа. Существующая «легенда» о том, что надо ставить как можно больше электролитов, критики не выдерживает, так как между R_i источника и R_n находится выходная лампа и ее импульсный ток и определяет ту энергию, которую надо запасти в фильтре, дальнейшее увеличение количества электролитов ведет только к увеличению R_i на высоких частотах. Конечно оптимально было бы использовать в фильтре фторопластовые или полипропиленовые конденсаторы имеющие минимальный коэффициент абсорбции /способность к поляризации и восстановлению заряда/, но к сожалению их удельная емкость мала и приходится идти на компромисс, используя электрические конденсаторы и шунтируя их пленочными. Хотя сейчас и появились полипропиленовые конденсаторы серий: K78–12, K78–17, K78–20 с емкостью порядка десятков микрофарад при напряжении 500, при цене гораздо дешевле импортных аналогов. В качестве электрических можно рекомендовать K50–27, наши измерения показали, что при цене на 10–15% дороже корейских и тайваньских они обладают в 3–5 раз меньшим сопротивлением на частоте 10 кГц. Использовать же K50–3, K50–12 просто недопустимо из–за роста сопротивления на частотах более 1 кГц.

Рассмотрев влияние сетевого трансформатора и фильтра на качество вторичного слухового образа, можно сделать очень простой вывод: все давным–давно известно, просто нужно все делать очень качественно и из очень качественных компонентов, а также не забывать, что существует ГОСТ 12.2.006–87 о электробезопасности аппаратуры, который как ни странно положительно влияет на качество и это не шутка.

Рассмотрим третий элемент эквивалентной схемы – собственно сам усилитель. Как хорошо известно есть две версии усилителей мощности: однотактные и двухтактные, Они могут строиться как на триодах, так и на тетродах и пентодах. Оба типа могут использовать и не использовать отрицательную обратную связь /ООС/. В общих чертах потенциальные преимущества и недостатки этих двух версий заключаются в следующем.

Однотактные:

–более адекватный субъективному восприятию спектр гармоник, плавно спадающий с отсутствием высших гармоник;

–проще конструкция и схемотехника;

–более прозрачный и детальный верхнечастотный регистр, лучшая детализация музыкального образа без смазывания отдельных нот, особенно заметная на оркестровых и хоровых фрагментах;

–низкий КПД, реально 15–20%, и, как следствие, малая выходная мощность;

–высокие требования к источнику питания, на порядок более высокие требования по пульсациям питающего напряжения, по сравнению с двухтактными усилителями;

–очень сложно получить низшую рабочую частоту порядка 30 Гц при сопротивлении анодной нагрузки более 2–3 кОм, так как из-за наличия постоянного подмагничивания в сердечнике трансформатора происходит падение магнитной проницаемости материала сердечника.

Поясним последнее утверждение на примере:

Индуктивность катушки с замкнутым стальным сердечником равна /1/

$$L = \frac{1,26 \mu Sc W^2}{Lc} \cdot 10^{-8}, \text{ Гн}$$

Где: μ – магнитная проницаемость сердечника; Sc – сечение сердечника (см^2);

W – число витков катушки; Lc – средняя длина магнитной силовой линии (см).

Следует напомнить, что магнитная проницаемость сердечника зависит от переменной составляющей индукции в сердечнике и от величины постоянного подмагничивания, а также от частоты. В данном случае нас интересует только зависимость от постоянного подмагничивания, а оно может привести к падению μ и L до десяти раз в зависимости от тока подмагничивания и количества витков. Компенсировать падение L увеличением количества витков можно, но при этом будет расти и подмагничивание пропорциональное току в катушке и количеству витков. Реально индуктивность растет очень медленно. Индуктивность первичной обмотки определяется по следующей формуле:

$$L = 0,3 \frac{R_n}{F_n} \text{ Гн}$$

Где: R_n – сопротивление нагрузки выходной лампы (Ом), F_n – низшая рабочая частота /Гц/

В качестве иллюстрации приведем следующий пример: исходные данные усилителя, $R_n = 2 \text{ кОм}$; $I_a = 0,2 \text{ А}$; $P_{\text{вых}} = 24 \text{ Вт}$.

При $F_n = 20 \text{ Гц}$; $L = 30 \text{ Гн}$; $R_{об}$ – сопротивление провода первичной обмотки.

Получим на сердечнике:

ПЛ25х50х65	$R_{об} / R_n = 0,3$
ПЛ25х50х120	$R_{об} / R_n = 0,25$
ПЛ32х64х80	$R_{об} / R_n = 0,28$
ПЛ32х64х160	$R_{об} / R_n = 0,2$

При $F_n = 30 \text{ Гц}$ $L = 20 \text{ Гн}$

ПЛ25х50х65	$R_{об} / R_n = 0,23$
ПЛ25х50х120	$R_{об} / R_n = 0,14$
ПЛ32х64х80	$R_{об} / R_n = 0,19$
ПЛ32х64х160	$R_{об} / R_n = 0,13$

Легко видеть, что увеличение веса трансформатора в 3 раза приводит к уменьшению $R_{об} / R_n$ всего лишь в 1,5 раза, а для получения хорошо проработанного низкочастотного регистра необходимо иметь это отношение лучше 0,1, так как за счет падения напряжения сигнала на сопротивлении первичной обмотки на низших частотах начнет падать КПД выходного каскада. Проще говоря мы получаем частотно зависимый делитель выходного напряжения, который не только обрезает низкочастотную часть сигнала, но и не позволяет воспроизвести динамику сигнала.

Повышение низшей рабочей частоты до 30 Гц несколько улучшает ситуацию. Единственный путь – это одновременное повышение анодного напряжения, для уменьшения тока подмагничивания и повышение низшей рабочей частоты до 40 Гц и подбор ламп с малым R_a .

Это мы слышим в реальных даже очень дорогих усилителях. Обычно выходная мощность составляет 10–15 Вт и присутствует рыхлый с отсутствием динамики бас.

Двухтактные:

- мощный, хорошо проработанный низкочастотный регистр, так как отсутствует постоянное подмагничивание;
- высокий КПД и, как следствие, высокая выходная мощность;
- меньшие требования к источнику питания по пульсациям выпрямленного напряжения;
- более простой выходной трансформатор;
- худшая проработка верхнечастотного регистра, так как сигнал усиливается двумя лампами и складывается в нагрузку, возникающие временные ошибки вызванные несовпадением времени прохождения сигналов приводят к искажению вторичного звукового образа;
- более сложная схемотехника.

На последнем свойстве следует остановиться особо, так как двухтактный каскад представляет собой симметричную структуру, где противофазные сигналы усиливаются отдельно, а суммируются только в нагрузке, то для реализации преимуществ необходимо обратить особое внимание на схемотехнику, определяющую эту симметрию. Первым каскадом где мы получаем два противофазных сигнала является фазоинверсный каскад обычно стоящий перед выходным каскадом. Наиболее удачной с нашей точки зрения является фазоинверсная схема на двух триодах с генератором тока. Как хорошо известно из теории дифференциальных усилителей симметрия этой схемы определяется качеством генератором тока, включенного между катодом и землей. В качестве примера приведем спектр гармоник и коэффициент нелинейных искажений для трех уровней сигнала при двух различных генераторах тока с эквивалентными сопротивлениями 11 кОм и 30 кОм и при трех одинаковых уровнях выходного сигнала : 10%, 30% и максимальном для данной схемы.

	Уровень	1 гар.	2 гар.	3 гар.	4 гар.	5 гар.	K %
11 кОм	0 Дб	0	-50	-55	-	-	0,36
	+10 Дб	0	-48	-42	-70	-50	0,94
	+20 Дб	0	-56	-20	-50	-40	10,1
30 кОм	0 Дб	0	-55	-60	-	-	0,2
	+10 Дб	0	-48	-60	-62	-56	0,45
	+20 Дб	0	-55	-25	-48	-42	5,7

Легко видеть, что с увеличением эквивалентного сопротивления падает общий уровень гармоник определяемый симметрией схемы. В качестве генератора тока можно использовать: резистор, лампу или транзистор.

Особо следует остановиться на подборе пар выходных ламп. Обычно их либо вообще не подбирают, либо подбирают по крутизне и напряжению запираения, что, как показывает

наш опыт, недостаточно, В качестве примера приведем спектр только второй гармоники сигнала 1 кГц на выходе усилителя при балансе и 10% разбалансе токов выходных ламп.

Баланс			Разбаланс 10%		
1900 Гц	2000 Гц	2100 Гц	1900 Гц	2000 Гц	2100 Гц
–	0 Дб	–	–40 Дб	0 Дб	–40 Дб

Мы специально обращаем внимание на столь малоизвестный параметр как возникающая амплитудная модуляция частотой 100 Гц и величиной 1% возникающая в связи с уменьшением степени подавления пульсаций источника питания свойственная всем симметричным схемам. Такая картина наблюдается на всех остальных гармониках. Смеем заверить, что это уже слышно. При большем разбалансе ситуация ухудшается. Общие искажения на выходе усилителя также растут очень значительно. Последние наши исследования привели к необходимости производить отбор пар ламп по совпадению вольт–амперных характеристик для двухтактного выходного каскада с точностью не хуже 5%, а, как правило, 2–3% во **всем диапазоне рабочих токов**. В качестве примера приведем спектр выходного сигнала при разбросе характеристик 2%, выходной мощности 1 Вт, на чистоте 1 кГц:

0 Дб – 60 Дб – 62 Дб

Важным оказывается не только общий процент расхождения, но и вид расхождения. Если построить кривую отклонений вольт–амперных характеристик пары ламп, то мы увидим разнообразные кривые.

Как уже отмечалось, лампы более индивидуальны с точки зрения обеспечиваемого ими качества звучания. Приведем (Табл.2) спектр гармоник выходного сигнала одноконтурного усилителя мощности без ООС на лампе EL–34, работающей в режиме А при амплитуде выходного сигнала, соответствующего мощности 1 Вт. Уровень первой гармоники принят за 0 дБ.

Как видно из таблицы, усилительные каскады на однотипных лампах даже одного производителя имеют различные спектры гармоник выходного сигнала, а значит, будет неодинаковым их звучание.

Таблица 2

Номер гармоники	Уровень гармоник, дБ			
	Лампы EL–34 одного производителя		Лампы EL–34 другого производителя	
	№1	№2	№1	№2
	1			
Вторая	–43	–38	–40	–40
Третья	–70	–66	–64	–64
Четвертая	–80	–	–	–
Пятая	–	–76	–74	–76

Ещё одним важным параметром усилителя является линейность выходной вольт–амперной характеристики. Только при помощи ООС можно добиться её линейности, т.е. скомпенсировать компрессионные свойства усилительных каскадов.

Выбор режима работы усилителя мощности обычно не представляет затруднений. Целесообразнее всего использовать режим А, как обеспечивающий получение меньших искажений и лучшее звучание.

Выходной трансформатор. Ключевой элемент все рекомендации по расчёту хорошо известны, но очень много важных и очень тонких нюансов не поддаются расчёту.

Необходимо добиться такого баланса собственных емкостей и индуктивностей, чтобы получилась линейно спадающую АЧХ. Без выбросов и провалов до частот $\sim 0,5\div 1$ МГц. Это не значит, что такова должна быть полоса пропускания трансформатора. Не должно быть паразитных резонансов за полосой пропускания. Мотаем штук пять и меряем, находим лучший и делаем 3÷5 вариантов вокруг этой конструкции. Для получения хорошего результата, по опыту – надо намотать около 10÷15 вариантов.

Резюмируя вышесказанное и базируясь на нашем опыте можно сделать следующие выводы:

а. Если мы любим тихую музыку в сольном исполнении и хотим подобрать звучание по своему вкусу, то надо слушать однотактник на триоде без ООС. Здесь открывается море возможностей для шаманства (подбора) аппаратуры, кабелей, различных примочек и т.д.

б. Если мы предпочитаем наиболее точное (нейтральное, не окрашенное) воспроизведение динамичных по амплитуде и частоте больших составов, то единственный путь это двухтактный усилитель на тетроре или пентоде с ООС. С током покоя соответствующим 10÷20% от максимального.

с. И конечно лампы. Полевика где-то между. И если транзисторы, то только никаких микросхем в звуковых цепях.