

Пролог

«Хотел бы, чтобы у меня была такая книга, когда я начинал собирать усилители»

Эта книга является моим адаптированным переводом книги Мерлина Бленкова, Разработка ламповых предварительных усилителей для гитары и баса. На данный момент переведена первая глава полностью, и выложена для общего доступа на рассмотрение гитарного D.I.Y. сообщества для дальнейшего редактирования. Пролог и вступление к книге от автора и от переводчика я решил составить после полного окончания перевода книги. При переводе, возможно, я допустил неточности в русской терминологии, это связано с тем что на практике чаще я сталкиваюсь с западной терминологией и сленгом, так как вся документация на английском, да и черпаю информацию я по большей части с буржуйских форумов.

Глава 1: Общий катод, каскад усиления триода.

Основы усиления. Линия нагрузки. Смещение и искажения. Приделы смещения. Применение смещения. Разработка элементарного триодного каскада. Постоянные данные вакуумной лампы. Математические расчеты усилительного каскада. Краткий отчет о сказанном.

Чтобы в целом понять усилитель, мы должны разобраться в основах. Большинство усилителей подобны по общей структуре или топологии. Начнем с понимания того как простой триод может усиливать напряжение, и как с помощью этого добиться ограничения сигнала, эффект «Distortion». Почти все гитарные усилители имеют предварительный усилитель, который состоит из числа ламп, таких как ECC83/12AX7. Редко, но в некоторых разработках используются лампы 12AT7, ECC82/12AU7 и 12AY7. Причина, почему везде используется один и тот же набор ламп, от части - историческая. Считается, что все усилители произошли от нескольких классических усилителей Fender, которые стали прародителями. Однако ECC83 обладает некоторыми свойствами, которые делают ее идеальной в режиме перегруза/ограничения сигнала. Существует сотни других ламп, которые могут быть использованы в каскадах предварительного усилителя с разным успехом, но коммерческий фактор заставил производителя и потребителя сосредоточиться на универсальной лампе. Ей стала ECC83, естественно большинство книги будет отталкиваться именно от этой лампы.

Для читателей, которые не знакомы с разновидностями маркировки заметим что, ECC83, ECC803, CV4004, M8137, 12AX7, 7025 и 6681 – все это одна и та же лампа. Разная маркировка говорит о разных производителях, странах или разных версиях/модификациях, но все они имеют одинаковые характеристики, и могут использоваться в одной схеме, то есть взаимозаменяемые. Нас так же не должны беспокоить дополнительные буквы в маркировке, (например 12AX7A). Однажды такая маркировка была использована для указания времени прогрева нити накала. Но в большинстве современных ламп все дополнительные индексы после маркировки можно рассматривать просто как коммерческую уловку.

Считается, что разные версии ламп имеют свой тональный характер, многое было сказано про очевидное превосходство, например Mullard «long plate» ECC83, и RCA «black plate» 12AX7. Но эти предметные отличия не имеют отношения к строению усилителя, и не будут тут рассмотрены. Настоящее тональное превосходство надо извлекать не из подбора ламп, а из выбора топологии, частотного формирования и манипулирования ограничительных характеристик, а также общего понимания как функционирует вся схема.

Основы усиления:

На рис1.1 показана простая цепь с использованием триода. Мы видим 2 входных контакта и два выходных. Один из входных контактов и один из выходных соединены вместе на катоде, поэтому они «общие» по отношению друг к другу, и обычно подключены к «земле». Это **общий катод** или **локальная земля каскада**, и это фундаментальный блок любого усилителя. И нужно это уяснить, прежде чем пытаться строить усилитель целиком, поскольку основные проблемы, с фоном и генерацией связаны именно с этим узлом.

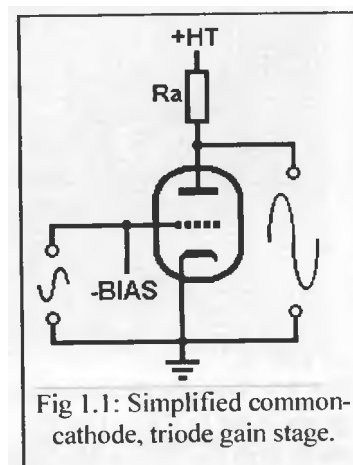


Fig 1.1: Simplified common-cathode, triode gain stage.

В хай фай технике такой каскад нужен, чтобы усилить малое входное напряжение в большее выходное и передать его на следующий каскад, в идеальном случае без

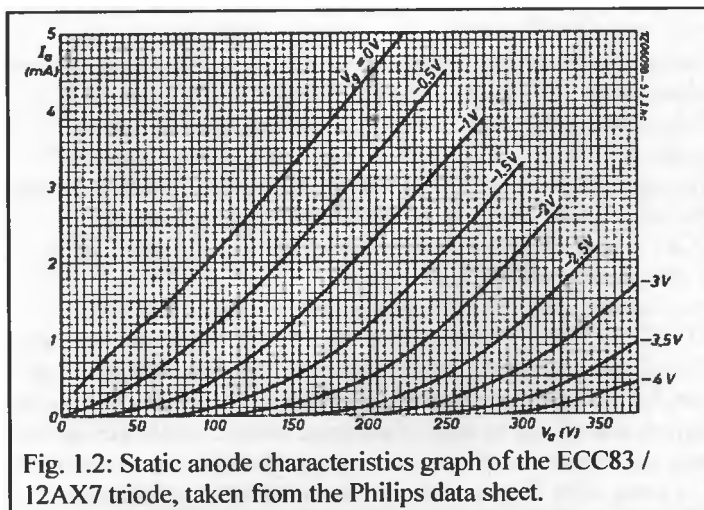


Fig. 1.2: Static anode characteristics graph of the ECC83 / 12AX7 triode, taken from the Philips data sheet.

изменений в структуре сигнала, не считая усиления амплитуды. Другими словами – усиление без искажений. В гитарном усилителе мы используем каскад с той же целью, но также позволяем ему вносить искажения и тональный окрас в сигнал.

Чтобы разработать такой каскад, нам нужны некоторые данные на лампу что мы будем использовать, в этом случае рекомендуется обращаться к Спецификациям производителя (Datasheet) конкретной лампы, почти все можно найти в интернете по запросу «ECC83

Datasheet» например, туда же можно добавить имя производителя, чем больше данных – тем точнее результат. Наиболее полезную информацию, можно извлечь из графика известного как **статические анодные характеристики** на рисунке 1.2, эта информация поможет понять, как лампа будет вести себя в схеме в зависимости от условий. В этом примере мы используем нашу почтенную ECC83/12AX7. Лампа, которая используется практически во всех хайгейн усилителях.

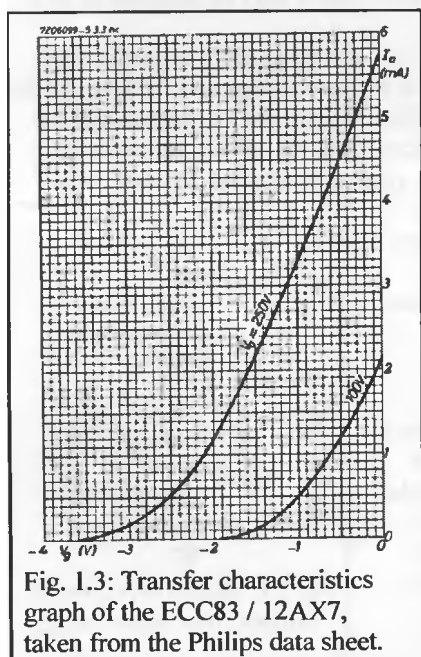


Fig. 1.3: Transfer characteristics graph of the ECC83 / 12AX7, taken from the Philips data sheet.

Статические анодные характеристики на рисунке 1.2 отображают шкалу тока анода I_a , по оси Y. Это ток, который течет от анода к катоду. По оси X нанесена шкала анодного напряжения V_a . Это потенциал, в вольтах поданный между анодом и катодом. Кривыми линиями на графике показано напряжение, которое движется от сетки к катоду V_{gk} . Эти кривые, более известны как **кривые сетки**. Важно понимать, что все указанные напряжения на этом графике измеряются относительно катода. Это значит, что катод является землей с нулевым потенциалом, что на практике в большую или меньшую сторону соответствует действительности. Также стоит отметить, что ламповые схемы в отличие от транзисторных схем являются высоковольтными, но слаботочными.

Кроме статической анодной характеристики, есть такая характеристика как **пропускная характеристика**, более известная как **динамическая характеристика**. Эти графики показывают напряжение смещения по отношению

к анодному току, при разных значениях анодного напряжения, и эти данные – это хороший показатель линейности конкретной лампы. Чем прямее линия на графике – тем более линейна лампа. На рис 1.3 мы видим, что ECC83 лампа практически идеально линейна, кроме участков с низким анодным током. В любом случае, оба этих графика отображают одну и ту же информацию, но в разном виде. Графика статических анодных характеристик, как правило, достаточно для общего применения.

Типичный усилительный каскад, как тот, что мы рассматриваем обычно имеет резистор, включенный между блоком питания и анодом. Это **анодный резистор R_a** . Он

Автор: Мерлин Бленков

Пекревод: Ковалев «gaint» Николай

обеспечивает нагрузку. В предусилительных лампах значение анодного резистора обычно лежит в пределах 100к, конечно могут быть и другие варианты, но это мы рассмотрим позже.

Также следует заметить, что многое зависит от блока питания, для этого примера мы возьмем блок питания на 300 вольт, это достаточно стандартное значение для большинства схем. Нам нужно узнать, как лампа будет работать под нагрузкой в 100ком, и мы можем это увидеть, нарисовав линию нагрузки.

Линия нагрузки:

Анодный резистор включается последовательно лампе. Согласно закону Ома, если ток через лампу не проходит, то на анодном резисторе не будет падения напряжения, значит анодное напряжение должно быть того же потенциала что и у блока питания. Мы можем отметить такую точку на графике статических анодных характеристик на рисунке 1.4, при значениях $I_a=0\text{mA}$, $V_a=300\text{V}$, назовем эту точку «А».

С другой стороны, если через лампу будет течь достаточный ток, то все доступное напряжение просядет на анодном резисторе, и потенциал на аноде будет нулевым. Рассчитаем по закону Ома ток, который нужен для таких условий.

$$V/R=I$$

$$300/100\text{k}=3\text{mA}$$

Это максимально возможный ток, который может протекать через нашу лампу (как будто она замкнута на коротко), пока мы не изменим напряжения блока питания или

номинал анодного резистора.

Поставим вторую точку «В» на отметке $I_a=3\text{mA}$, $V_a=0\text{V}$.

Поскольку закон Ома линеен, мы можем спокойно соединить эти 2 точки прямой. Эта прямая называется **линией нагрузки** или **нагрузочной прямой**, и это самый мощный инструмент анализа, который можно использовать в ламповой схемотехнике.

Если мы рассмотрим линию нагрузки, то мы заметим, что она пересекается с сеточными кривыми. Каждая точка пересечения показывает нам, какие значения V_a и I_a будут при конкретных значениях V_{gk} . Помните, что график подразумевает, что катод в

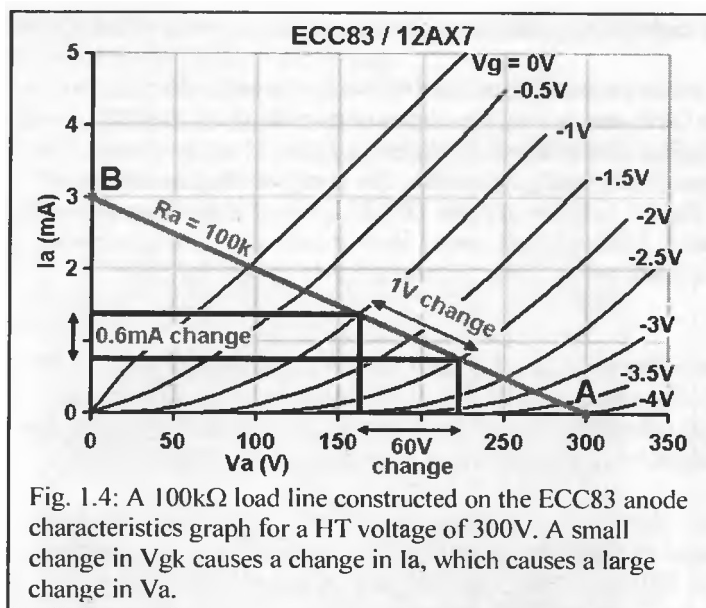


Fig. 1.4: A 100k Ω load line constructed on the ECC83 anode characteristics graph for a HT voltage of 300V. A small change in V_{gk} causes a change in I_a , which causes a large change in V_a .

данном случае имеет нулевой потенциал, и сеточные кривые удобно нанесены с относительным сеточным напряжениями. Естественно в реальности между этими кривыми существует бесконечное количество других сеточных кривых, но если отобразить их всех, то такой график невозможно будет читать.

Для примера; если на сетке у нас будет -2 вольта, из графика видно, что ток будет 0.8mA, а анодное напряжение 224 вольта. Если же поднять напряжение на сетке до -1 вольта, то ток вырастет до 1.4mA, а анодное напряжение упадет до 164 вольт. Вот так лампа и усиливает, мы изменили напряжение сетки на 1 вольт, а анодное напряжение изменилось на 60 вольт. Также сеточное напряжение имеет большое влияние на анодный ток, поэтому сетку часто называют **управляющей сеткой**. Также замечу, что лампа управляется напряжением сетка-катод. Поэтому лампы являются устройствами

Автор: Мерлин Бленков

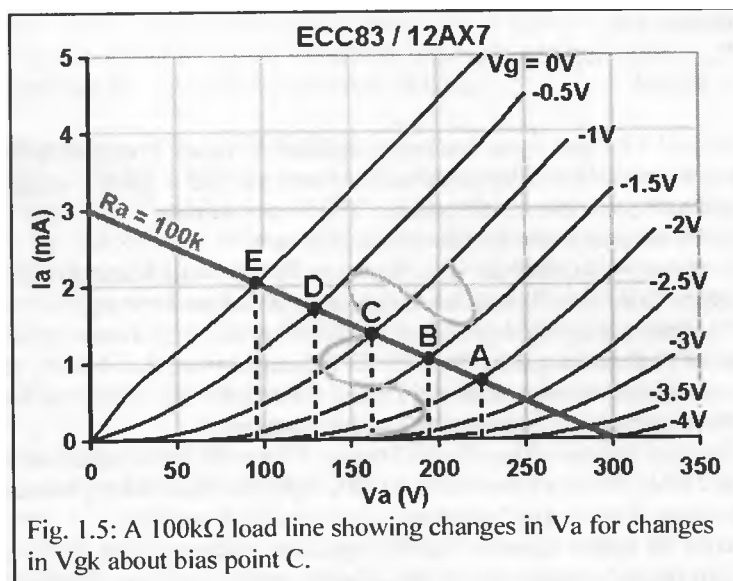
Пекревод: Ковалев «gaint» Николай

управляемыми напряжением (усилителями напряжения), и это делает их идеальными в использовании с электрогитарой, потому как электрогитары являются генераторами напряжения, которое звукосниматель преобразует с колебания струн в сигнал – это относительно существенное напряжение, с практически отсутствующим током.

Смещение и искажения:

После того как мы нарисовали линию нагрузки, нужно получить от этого какую то практическую пользу. До этого мы рассматривали только постоянное напряжение, но усиливать нам нужно переменное напряжение.

Представим себе идеальную синусоиду. Волна состоит из пиков и провалов. Между ними есть некая нейтральная точка, можно сказать, что волна растет до этой точки и затухает после нее. Теперь чтобы перейти на термины напряжения, скажем, что у нас есть синусообразная волна, которая колеблется позитивным и негативным напряжением относительно какого-то нейтрального напряжения. Это нейтральное напряжение - наша стартовая точка, и от нас зависит где она должна находиться на линии нагрузки, для того чтобы лампа смогла корректно усиливать как негативную так и позитивную часть напряжения. Подстройка этой точки называется смещением лампы. Например, мы можем зафиксировать напряжение сетки на -1 вольте, теперь это наша точка смещения, пометим ее точкой «С» на графике 1.5. Пока что мы не подаем никакого сигнала, лампа находится в состоянии покоя. Из графика мы видим, что смещение покоя в -1 вольт вызывает ток покоя в 1.4мА, и анодное напряжение покоя в 164 вольта.



Теперь мы подадим синусообразный сигнал с генератора амплитудой в 1 вольт. Вначале напряжение сетки возрастет до -0.5 вольт (точка «D») что приведет к падению анодного до 130 вольт, а потом напряжение на сетке упадет до -1.5 вольта (точка «B») и анодное возрастет до 195 вольт. Мы видим, что позитивный входной сигнал производит негативный выходной сигнал, то есть получается, что выходной сигнал находится в противофазе относительно входного сигнала, развернут на 180 градусов. Такой каскад называется **инвертирующим каскадом**.

И так наш входной сигнал в 1 вольт производит (190-130)=65 вольтный выходной сигнал, на аноде относительно катода. Таким образом, мы можем посчитать коэффициент усиления каскада (**КУ каскада**)

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-65}{1} = -65$$

Знак минус указывает, что выходной сигнал инвертирован, Для слухового восприятия знак сигнала не важен, так как человеческий слух не может различить изменение фазы. Но работая с гитарным сигналом, мы осознанно манипулируем с формой волны, которая имеет пики и спады, поэтому нам важно знать и понимать, какой каскад усилителя инвертирован, а какой нет.

Усиление каскада также может быть выражено в децибелах по формуле.

$$A(dB) = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

В нашем случае:

$$A(dB) = 20 * \log 65 = 36,3dB$$

Таким образом, наш сигнал с 1-го вольта, усилился в 65 раз. По всей видимости, входной сигнал в 2 вольта усилиться еще в два раза сильнее на выходе, а именно $65 \times 2 = 130$ вольт, а сигнал в 3 вольта даст 195 вольт на выходе. Но на самом деле это, ни так.

Предположим мы увеличили входной сигнал до 2-х вольт, при этом точку смещения оставили прежней. Рассмотрим вначале позитивную полуволну входного сигнала: напряжение на сетке растет с -1 до 0 вольт, а анодное меняется с 165 до 94 вольт. КУ каскада - 71. Усиление немного больше чем до этого, это потому что кривые сетки на этом участке становятся более выпуклыми по направлению к линии нагрузки.

Теперь отрицательную часть полуволны сигнала:

Входной сигнал меняется с -1 до -2-х вольт. А напряжение на аноде в свою очередь с 165 до 224 вольт. Усиление в 59 раз. Гораздо меньше, чем у позитивной части сигнала, и даже меньше чем с 1-но вольтовым входным сигналом. В этом участии кривые сетки уже становятся более вогнутыми по отношению к линии нагрузки. Благодаря такой несимметричности составляющих волны, сигнал сдавливается и компрессируется. Именно такой тип естественной компрессии и делает ламповое усиление таким теплым и приятным на слух. Этот процесс обогащает сигнал четными гармониками, которые на октаву выше, чем входной сигнал, это специфически и очень приятно окрашивает звук, делая его «плотнее» и «теплее», добиваясь классического лампового звука.

Все это можно выразить в виде цифр. Анодное напряжение стало на 71 вольт отрицательнее, и только на 59 вольт положительнее от своего изначального значения. Выразим гармонические искажения второго порядка в процентном соотношении.

$$H2\% = \frac{CD - CA}{2(CD + CA)} * 100$$

$$H2\% = \frac{71 - 59}{2(71 + 59)} * 100 = 4.6\% \text{ Гармоник второго порядка}$$

Используя этот же метод, мы можем рассчитать процент гармонических искажений для примера с входным сигналом в 1 вольт. Мы получим 3.1% гармонических искажений 2-го порядка.

Это говорит о том что искажения растут вместе с ростом уровня входного сигнала, вследствие того что лампу заставляют работать за пределами своих линейных

характеристик. Это можно увидеть и на графике динамических характеристик, ближе к основанию графика, как раз в той области, где наблюдается наибольшая нелинейность лампы. Например, стандартный транзистор менее линеен в отличие от триода, транзистор обладает более «S» образной динамической характеристикой. Из-за этого транзистор генерирует по большей части гармонические искажения 3-го, 5-го и даже более высоких порядков, в которых мало смысла, которые немзыкальны, поэтому транзистор не дает такого теплого звука.

Ограничение тока сетки:

Возвращаясь к рисунку 1.5, давайте увеличим входной размах сигнала до 3-х вольт. При отрицательной полуволне сигнала, напряжение на сетке упадет до -2.5 вольт, а на аноде возрастет до 250 вольт. Но когда, руководствуясь графиком статических анодных характеристик, мы попробуем увеличить напряжение на сетке положительной полуволной сигнала, мы заметим, что на графике отсутствуют сеточные кривые для значений V_{gk} больше 0 вольт. В условиях, когда напряжение на сетке становится положительным, лампа становится, полностью открыта. Причем открыта как по цепи анод-катод так и по цепи сетка катод. Что в свою очередь вызывает просадку входного сигнала. То есть входное сопротивление падает с десятков килом до нескольких ом. Такое поведение лампы называется **прямым током сетки**.

С физической точки зрения работа лампы заключается в ограничении тока через лампу путем изменения потенциала сетки. Именно потенциал сетки, в нормальном режиме лампы, ограничивает проток электронов в лампе. И чем он ниже потенциала катода, тем большим барьером для электронов является сетка. Что и видно на графика **статической анодной характеристики**.

Физически в лампе происходит следующие: на катоде (технический наш минус) скоплено очень много электронов, которые выходят в вакуум, из катода, за счет разогрева этого металла спиралью накала расположенного очень близко к катоду. В тоже время на аноде (технический плюс) есть недостаток электронов, пустые места. Соответственно электроны будут лететь по лампе от катода к аноду, чтобы восстановить равновесие. Но вот в обратном направлении электроны двигаться не могут, так как они не имеют достаточной энергии для выхода из анода. Вот так работает вакуумный диод. Для регулировки потока электронов, движущегося от катода к аноду, между ними ставится сетка. Принцип регулирования заключается в создании на сетке потенциала меньшего потенциала катода. То есть увеличения плотности электронов в металле сетке. В следствии устанавливается магнитный барьер для электронов вокруг катода, и ток электронов по лампе ограничивается. Это ограничение и описывает **статическая анодная характеристика**.

В случае, когда на сетке и на катоде одинаковый потенциал, сетка перестает участвовать в процессе регулировки вообще. И ток лампы становится максимальным (лампа полностью открыта).

В случае, когда потенциал сетки больше потенциала катода электроны из катода начинают лететь не только к аноду, но и сетке. Такой эффект называется **обратным током сетки**. При этом входное сопротивление сетки лампы падает, что ведет за собой падение напряжения на источнике сигнала.

Этот эффект известен как **токовое ограничение сетки**, выходной сигнал при этом обрезается (**ограничивается**) на своей негативной составляющей. Нужно понимать что,

не смотря на то, что сигнал на сетке начинает обрезаться – лампа все равно усиливает все то, что находится на ее сетке.

Часто такое ограничение сигнала называют **насыщением**. Это верно для транзистора, где эффект ограничения достигается насыщением (**сатурацией**), но не верно для лампы. В вакуумных лампах эффект сатурации можно наблюдать при максимальном токе, который может излучать катод. На самом деле, насыщение катода повреждает его поверхность, и лампа не должна эксплуатироваться в таком режиме.

Эффект ограничения наступает не мгновенно, прямой ток сетки наблюдается уже при значении $V_{gk} = -1$ вольт, точное значение этого порога зависит от типа лампы. В спецификациях на лампу такой порог часто указан как $V_{gk(max)}$, это значение указывает на точку, в которой ток сетки начинает превышать 0.3 микроампера, и например для ECC83 это значение -0.9 вольт. Также стоит заметить, что ток сетки увеличивается обратно пропорционально напряжению на аноде. По причине слабой способности анода отталкивать электроны с сетки, у которой напряжение ниже. Это частично объясняет, каким образом тон «перегрузки» связан с анодной нагрузкой.

На рисунке 1.6 видно как ток сетки увеличивается, при достижении сетки все более положительного потенциала. Кривыми нанесены три распространенных типа ламп. Поскольку этот эффект не мгновенный, ограниченный сигнал все еще будет скругленным на краях, при том что входное сопротивление стремительно начнет падать, порождая при этом четные гармоники 2-го и 4-го порядков. При этом более жесткое ограничение, когда шапка синусоиды сигнала срезана, порождает нечетные гармоники 3-го и 5-го порядка, что добавляет остроты звуку.

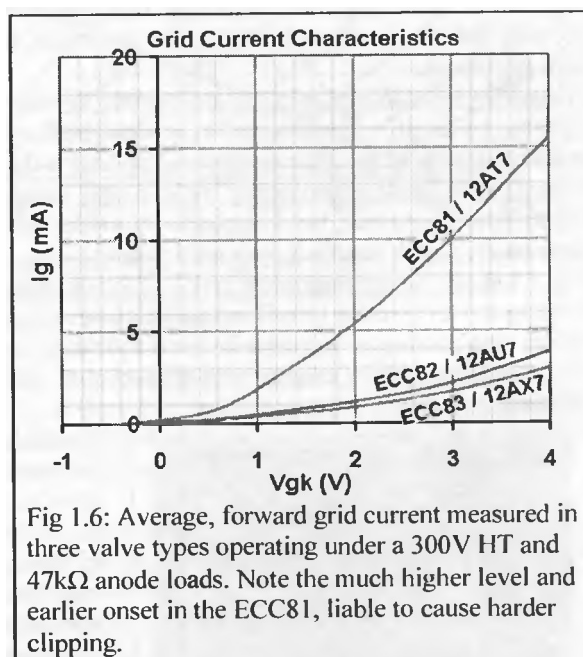


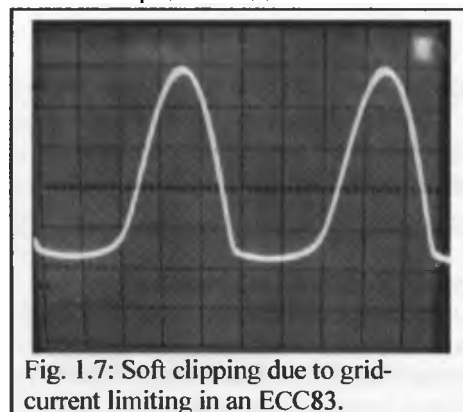
Fig 1.6: Average, forward grid current measured in three valve types operating under a 300V HT and 47k Ω anode loads. Note the much higher level and earlier onset in the ECC81, liable to cause harder clipping.

Скорость ограничения сигнала, также зависит от сопротивления анодного резистора, поскольку входное напряжение проседает именно на нем. Если сопротивление слишком мало (несколько сотен Ом, или меньше), это позволит сделать сетку более позитивной, в результате это даст более мягкую компрессию и более тонкое (узкое) ограничение. Поэтому такие режимы редко применяются на практике. Если же сопротивление будет слишком большим (сотни кило Ом), тогда падение напряжения будет более резким, вызывая более жесткое ограничение и производя больше нечетных гармоник, это основная фишка хай гейн усилителей.

У транзисторов нет эквивалента ограничения сеточного тока, и они могут работать исключительно в режиме жесткого ограничения сигнала. В результате транзисторы могут производить в основном нечетные гармоники высоких порядков, что на звуке отражается фузящим тоном с сигналом в виде прямоугольной волны. Это одна из основных причин, почему нельзя добиться лампового звука используя транзисторы. С полевыми транзисторами ситуация лучше, они также как и лампы испытывают падение входного сопротивления, но такое падение слишком резкое, в результате все равно получается слишком жесткое ограничение.

На рисунке 1.7 показана осциллограмма усилительного каскада на ECC83, который введен в режим ограничения сеточного тока, сигналом в 1 килогерц и анодным резистором в 1 кило Ом. Тут видно сигнал, как с сетки так и с анода. Сигнал сетки был инвертирован и отмасштабирован, после чего наложен на сигнал, снятый с анода, картинки полностью совпали, так как лампа усиливает все то, что находится на сетке, в каком бы виде оно не было.

На осциллограмме мы видим достаточно резкий пик у позитивной полуволны, это говорит начале проводимости сетки и о наличии нескольких гармоник высокого порядка, этой точкой можно манипулировать, меняя значение анодного резистора, или напряжение блока питания. Когда входной сигнал начнет затухать, ток сетки начнет уменьшаться и лампа плавно выйдет из ограничения. При ограничении тока сетки, такая асимметрия между пиками и спадами в сигнале типичная для любой лампы.



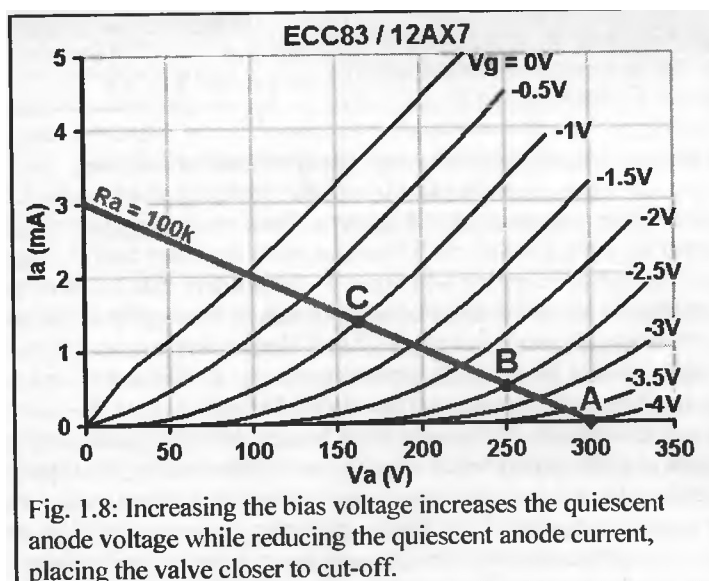
Отсечка:

До этого мы рассматривали только амплитуду входного сигнала. Давайте теперь посмотрим, что будет, если мы зададим смещение каскада другими способами. Понятно, что если мы сдвинем точку смещения левее, мы приближаем момент ограничения тока сетки. На самом деле мы можем вообще не задавать смещение, в этом случае точка смещения будет точно на отметке $V_{gk}=0$ и наша лампа станет полупериодным выпрямителем. Негативная часть полуволны усилится, при этом позитивная часть практически полностью будет срезана (отсечена).

Теперь давайте увеличим точку смещения, $V_{gk}=-2.5$ (точка B на рисунке 1.8) напряжение на аноде 250 вольт. На вход мы подаем сигнал амплитудой в 3 вольта.

Теперь видно, что анодное может просесть до 165 вольт, о не может подняться выше точки A (больше чем может выдать наш источник питания). Выходной сигнал начнет ограничиваться, но в этом случае будет ограничиваться уже его позитивная составляющая. За счет входного сигнала потенциал сетки становится настолько негативным, что электроны полностью отталкиваются сеткой, не имея возможности пройти сквозь нее. Течение тока в таком случае отсечено, и все напряжение блока питания просаживается на лампе полностью. При таких условиях ограничение происходит только в выходном сигнале, при этом входной сигнал не ограничивается.

На графике видно, что за порогом отсечки, кривые сетки начинают группироваться вместе и сходятся в одну точку, это сокращает усиление и компрессию на пиках сигнала. Хотя если верить графику, то отсечка должна строго происходить при значении $V_{gk}=-4$, то на практике этого не достаточно. Это потому что электроны все еще могут проходить сквозь отверстия и края сетки, там, где электростатическое поле имеет меньшее влияние, хотя по теории ток уже должен прекратить течь. Это известно как **эффект острова** и на



практике практически невозможно полностью остановить поток электронов. Поскольку отсечка происходит с задержкой, то такое ограничение часто гораздо мягче, чем ограничение тока сетки, и таким ограничением нельзя управлять при помощи анодного резистора.

На рисунке 1.9 показана осциллограмма усилительного каскада на ECC83, который находится в режиме отсечки, входной сигнал бы инвертирован и отмасштабирован, после чего наложен на выходной для удобного сравнения с выходным сигналом. Когда каскад подходит к порогу отсечки, усиление падает, как это видно по сплюсненным пикам. Как только каскад выходит из отсечки – усиление резко возвращается, при этом порождая в основном гармоники 2-го и 3-го порядков, при этом гармоники более высоких порядков плавно уменьшаются, как это видно по плоской «шапке» в пике сигнала.

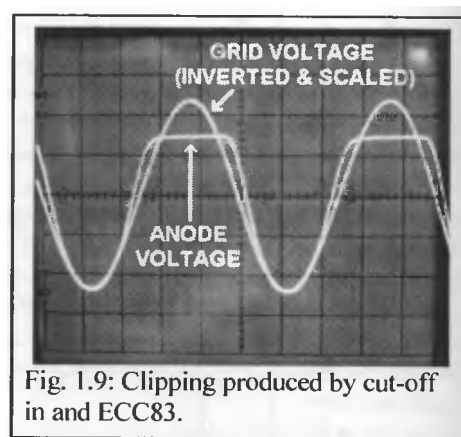


Fig. 1.9: Clipping produced by cut-off in and ECC83.

Объем: входная чувствительность и предел ограничения:

Как мы выяснили, если выбирать точку смещения левее линии нагрузки, то выходной сигнал будет ограничиваться на своей негативной составляющей, вследствие ограничения сеточного тока. С другой стороны, если мы сдвинем точку смещения правее линии нагрузки, то мы получим ограничение/отсечку уже на выходном сигнале и на его позитивной составляющей. Логично предположить, что если установить точку смещения где-то посередине, мы получим сигнал, который будет ограничен примерно одинаково как в негативной, так и в позитивной составляющей, но для этого нам потребуется более мощный входной сигнал. Эта процедура известна как **центральное смещение**, и она дает нам максимальный предел ограничения, или как говорится дает нам наибольший **объем** в звуке. В тоже время мы сможем скормить нашей сетке наибольший из возможных по амплитуде сигналов до порога ограничения. Другими словами **чувствительность входа** нашего каскада наименьшая в данных условиях. Входная чувствительность каскада в данном случае, это необходимое напряжение для того чтобы нагрузить каскад до порога ограничения, если каскад легко перегрузить – то чувствительность высокая, если сложнее – то чувствительность ниже. Повышение анодного напряжения, даст нам больший объем, за счет сдвига линии нагрузки вправо, притом что, реальное ограничение каскада зависит от амплитуды входного сигнала. Вот почему «чистый» усилитель не требует слишком высокого анодного напряжения, мы можем просто погасить уровень входного сигнала прежде чем подать его на сетку, вместо того чтобы повышать анодное.

Подведем итоги. Манипулируя точкой смещения, мы можем заставить сигнал ограничиваться ассиметрично (когда одна из составляющих волны ограничена больше другой), или симметрично (когда вся волна ограничена одинаково). Ассиметричное ограничение дает нам четные гармоники преимущественно второго порядка. Симметричное ограничение порождает в основном нечетные гармоники и более традиционный перегруженный звук, хотя некоторые четные гармоники все равно будут присутствовать. На рисунке 1.10 показана осциллограмма лампы ECC83 с центральным смещением, которая работает в режиме перегруза. Хотя мы видим, что в сигнале появляется

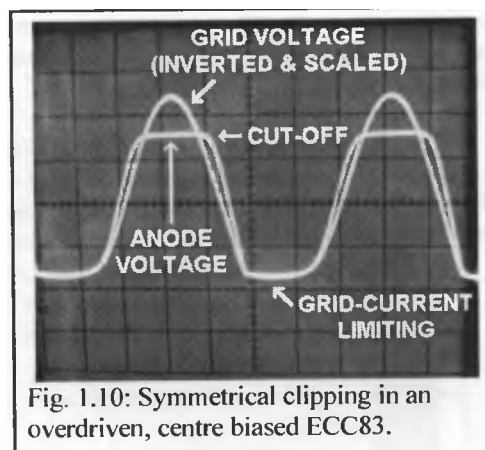


Fig. 1.10: Symmetrical clipping in an overdriven, centre biased ECC83.

Автор: Мерлин Бленков

Перевод: Ковалев «gaint» Николай

ступенька, и он начинает принимать форму прямоугольной волны, округление вершин все еще весьма велико, гармоника «хрупкого звука» отсутствуют, получается классический роковый перегруз.

Когда напряжение смещения мало, оно вызывает большой анодный ток, делает лампу физически горячей, это известно как **теплое смещение**, или **горячее смещение**, и позволяет получать теплый блюзовый подгруженный звук, но если смещение слишком горячее, это приводит нас к сырому (raw), или даже фузящему звуку. И от обратного, смещение, которое ближе к порогу отсечки, называется **прохладное или холодное смещение**, и позволяет нам получить более жесткий, кранчевый звук, и это является наиболее желательным способом отстроить смещение предварительного усилителя, и такой способ широко распространен в очень перегруженных предварительных усилителях. Поскольку от факта того как будет отстроено смещение каждой лампы, зависит то как будет искажать/перегружать сигнал каждый каскад, смещение оказывает огромное влияние – пожалуй даже самое главное влияние на общий звук всего усилителя, который может быть чистым и джазовым, теплым и блюзовым, грязным, песочущим, или даже жестким и фузящим.

Для кристально чистого звука, в основном выставляют точку смещения ближе к центру кривых сетки, так как это позволяет подавать на вход более мощный сигнал и перегрузить такой каскад очень сложно, плюс это позволяет нам получить наибольший объем в звуке. Входной каскад большинства усилителей является как раз с центральным смещением, или близок к этому. Стоит помнить, что лампы не идеально линейны, а это значит, что некоторая степень искажения все-таки будет наблюдаться, даже в самых чистых усилителях. Отчасти именно это делает чистый звук лампового усилителя теплее и более детализированным, в сравнении с твердотельным усилителем. Холодное смещение, когда смещение находится очень близко к порогу ограничения, редко используется в классических гитарных усилителях, но стало обычным делом, в современных хай гейн усилителях. Хорошим примером будет усилитель Soldano SLO100, этот усилитель использует 39 килоомный резистор в третьем каскаде. Это заставляет каскад уходить в раннее ограничение задолго до того как ток сетки начнет ограничиваться. Это добавляет в звук сустейн, делает его тягучим, типичный звук хеви-метала. Поскольку холодное смещение уменьшает КУ каскада, это помогает избежать совокупного усиления каскадов в предварительном усилителе, что сделало бы усилитель неуправляемым и слишком чувствительным к паразитным колебаниям. Один каскад с холодным смещением, это как бальзам, который помогает избежать слишком сырого (raw) звука после нескольких каскадов с горячим смещением.

Большинство каскадов в современных хай гейн усилителях, все же с центральным смещением, либо же смещение каждого инвертирующего каскада настроено противоположно смещению не инвертирующих каскадов, то есть они чередуются, горячий – холодный – горячий - холодный. Такой подход позволяет обогатить звук достаточным соотношением как четных, так и нечетных гармоник, для классического, открытого звучания. Позже, ограничивая одну полуволну сигнала, мы получим мощный, обогащенный четными гармониками звук, для богатых и тягучих перегруженных тонов, более современный звук. Но конечно тут нет правил, оптимальное соотношение каскадов и их смещение можно получить только экспериментальным путем.

Внимательный читатель может спросить: если смещение имеет такое большое влияние на звук, почему тогда не сделать регулировки смещения каждого каскада доступными, и не вывести их в виде потенциометров на переднюю панель усилителя? И на самом деле, это сделать не сложно, но мы никогда не видели усилителя, в котором есть такие регулировки. Что ж, вот четыре причины почему:

- Почти во всех ламповых предварительных усилителях используется смещение катода (к этому мы вернемся позже), и чтобы такое смещение

Автор: Мерлин Бленков

Пекревод: Ковалев «gaint» Николай

сделать регулируемым, нам потребуется потенциометр, через который будет постоянно течь катодный ток. При попытке регулировки такого потенциометра, мы будем слышать раздражающий скребущий призвук, а также это сильно повлияет на частотный диапазон каскада.

- Всегда встает вопрос себестоимости, потенциометры гораздо дороже, чем обычные постоянные резисторы, которые используются в цепях смещения.
- Часто подстройка смещения нуждается в очень маленьких диапазонах, чтобы добиться наилучшего звучания усилителя. Как только баланс достигнут, усилитель должен все время звучать на высшем уровне, а подстроек звука уже и так достаточно на передней панели.
- Большинство гитаристов уделяют мало внимания настройкам усилителя, многие вообще просто выкручивают все ручки на максимум, представьте, что было бы, если бы им были доступны ручки регулировки смещения каскадов!

Любители поэкспериментировать могут, конечно, проиграться с настройкой смещения, но скорее всего они поймут, что есть большой смысл в том, что производители усилителей не делают смещение каскадов настраиваемыми. Правда смещение выходных ламп часто бывает доступной к настройке пользователем, но это нужно только для того чтобы заменить лампы и настроить их смещение для получения максимальной мощности.

Приделы смещения:

Есть некоторые ограничения того как мы можем отстроить смещение лампы. Во-первых, есть некоторое предельное значение мощности, которое может быть рассеяно анодом, в спецификациях это параметр указан как **Pa(max)** или **Wa(max)**. Этот параметр зависит от физической массы анода и способности лампы излучать тепло. Если слишком долго превышать максимально допустимый уровень этого параметра, то анод разогреется докрасна. И в конечном итоге просто расплавиться, либо начнет плавить стеклянную оболочку лампы. В любом случае лампу ждет неизбежная смерть. Если кривая максимального рассеивания анода не указана в графике статических анодных характеристик, то ее можно дорисовать вручную. Это можно сделать, просто подсчитав максимально доступный анодный ток для заданных анодных напряжений. Например, спецификации к лампе ECC83 допускают максимум 1 ватт мощности, который может рассеять анод при напряжениях в 500, 400, 300 и 200 вольт, соответственно максимальному анодному току для каждого из напряжений.

$P/V=1$
 $1/500=2.0\text{mA}$
 $1/400=2.5\text{mA}$
 $1/300=3.3\text{mA}$
 $1/200=5.0\text{mA}$

Теперь мы можем нарисовать параболическую кривую через эти точки, как показано на рисунке 1.11. Область за кривой отображает область, где анод превышает

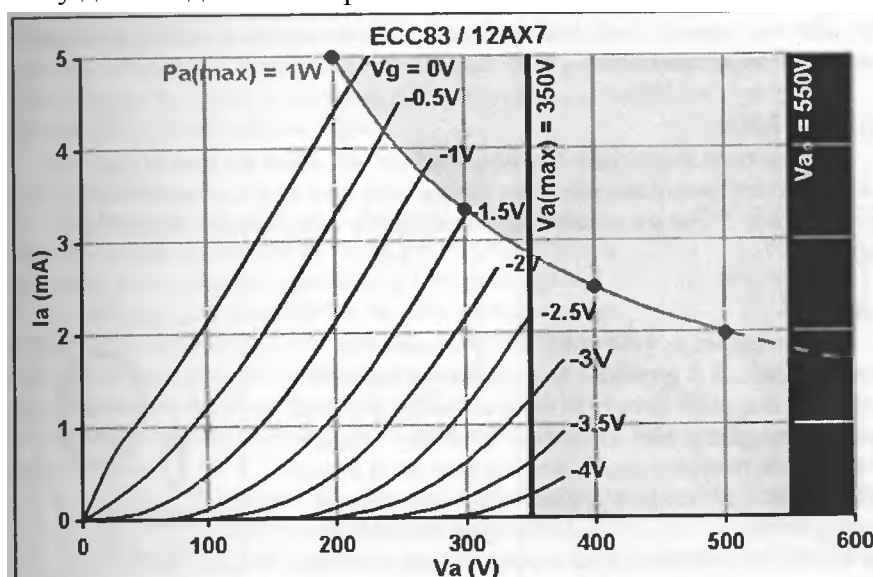


Fig. 1.11: Plotting a maximum anode dissipation curve and safe-operating area.

Автор: Мерлин Блен
Перевод: Ковалев «gain»

допустимую мощность рассеивания в 1 ватт, а область до кривой – это область безопасной работы лампы. Поэтому смещение НЕДОЛЖНО вылизать за эту область.

В случае с мощными выходными лампами, часть линии нагрузки может вылизать за кривую, так как во время усиления сигнала максимально допустимая мощность рассеивания превышает максимум только на некоторое время. Это допустимо потому-то лампы больше чем половину времени будут рассеивать гораздо меньшую мощность, чем максимально допустимую.

Во-вторых, есть максимально допустимое напряжение, которое может находиться на аноде некоторое время, пока это напряжение не осядет на других электродах внутри лампы. В спецификациях этот параметр указан как **Va0**, и для ECC83 это 550 вольт. Анодное напряжение НИКОГДА не должно превышать это значение. Так что и блок питания не должен выдавать больше напряжение, чем может усвоить лампа. Эта область закрашена черным на рисунке 1.11.

В-третьих, есть максимально допустимое статичное анодное напряжение, по спецификациям это параметр **Va(max)**, и для ECC83 это 350 вольт. Поэтому точка нашего смещения НЕДОЛЖНА, лежать правее $V_a=350$ вольт, и эта область закрашена серым на рисунке 1.11. Но во время усиления лампой анодного напряжения, допускается превышение этой границы, при условии, что V_a не превышает постоянно.

Некоторые лампы также имеют параметр максимально допустимого катодного тока, но это касается в основном мощных выходных ламп.

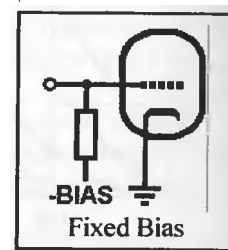
Теперь мы полностью определили область, в которой безопасно выставлять смещение для лампы, и линия нагрузки не должна выходить за эту область. Выходные каскады часто работают очень близко этим границам, но это больше зависит от условий их работы.

Применение смещения:

Как мы уже узнали, выбор типа смещения позволяет нам влиять на тип перегруза. И в целом влияет на тон усилителя. Но теперь нужно применить накопленные знания на практике. Есть несколько способов установить нужное напряжение смещение лампе.

Фиксированное смещение:

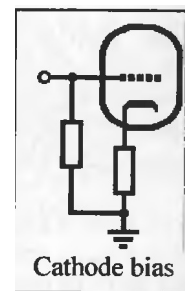
Также известно как смещение сетки, этот метод подразумевает, что катод подключен напрямую к земле, и смещение задается отрицательным напряжением прямо в сетку, при помощи сеточного резистора утечки. В этом случае такое смещение можно сделать подстраиваемым для пользователя, но как только смещение установлено, оно не должно меняться, другими словами должно стать зафиксированным, в независимости от того как лампа будет работать. Напряжение для смещения может быть взято от источника питания или от батарейки. Взять отрицательное напряжение от источника питания довольно просто, но оно должно быть достаточно чистым и малошумным, если мы собираемся подавать его на смещение лампы, и это добавляет сложность в задачу. В основном этот метод наиболее распространен для задания смещения мощным выходным лампам, для того что бы добиться их максимальной выходной мощности.



С другой стороны при использовании батарейки, есть некоторые неудобства связанные с ее сроком службы, который подразумевает ее периодическую замену. Но если использовать литиевую батарейку, мы можем ожидать от нее несколько лет честной службы. В любом случае батарейки в цепях смещения встречаются редко, все еще распространены в некоторой хайфай аппаратуре, но мы не найдем их в гитарных усилителях, потому что там преимущественно используется смещение катода.

Смещение катода:

Также известное как автоматическое смещение, этот метод смещения заключается в добавлении сопротивления последовательно катоду. В этом случае вольтаж будет формироваться при помощи этого резистора, за счет того что мы повышаем потенциал катода относительно сетки, тем самым влияя на анодный ток. У этого метода есть дополнительно преимущество, заключающееся в самоограничении тока. Если ток через лампу растет, то растет и вольтаж смещения, это предотвращает изменение анодного тока, поэтому мало шансов что лампа выйдет из режима, или случиться какая-то другая неисправность.



Еще одно преимущество такого метода, заключается в том, что это дает разработчику некий контроль над усилением, линейностью, выходным сопротивлением, и что самое важное, над частотной характеристикой каскада, в случае использования или не использования катодного конденсатора. С этим мы разберемся более детально чуть позже.

Сейчас будет не лишним внести некоторую ясность по поводу разных способов задания смещения. *Все что нам нужно добиться смещением, так это просто сделать сетку более негативной, чем катод, что по сути одно и то же что сделать катод более позитивным, чем сетка. И знак напряжения, которые при этом мы получим на отдельных взятых точках – неважен.* Нет никакой разницы между случаями, когда мы тестером намеряем на сетке отрицательно напряжение, а на катоде ноль вольт, и случаем когда на катоде будет напряжение со знаком плюс, а сетка тоже будет положительной, но с меньшим напряжением. Все дело только в разнице напряжений между сеткой и катодом.

Смещение утечки тока сетки:

Также метод известен как **контактное смещение**. Метод заключается в получении негативного напряжения на сетки путем использования сеточного резистора утечки очень высокого сопротивления. Во время работы каскада, несколько электронов всегда будут срывать с сетки, и сливаться через сеточный резистор утечки. Если сопротивление этого резистора будет достаточным, то негативного напряжения на сетки, получаемого за счет тока утечки, должно быть достаточно для того чтобы задать лампе автоматическое смещение. Но тем, ни менее в наши дни этот метод практически не используется в аудио аппаратуре по многим причинам:

- Эффективность сильно зависит от конкретно взятой лампы. Кроме того что сетка накапливает электроны, сетка собирает и позитивно заряженные ионы, а также излучает электроны. Степень такого излучения в основном зависит от температурных условий и степени физического загрязнения сетки во время ее производства на заводе. А над этими параметрами у разработчика нет контроля.
- Этот метод требует резистора с очень высоким сопротивлением, что вносит в звук слишком много тепловых шумов от такого резистора.
- Номинала резистора непредсказуем, и приходится производить подбор методом научного тыка. Напряжение, которое мы в результате получим, зависит от возраста лампы. В среднем, большинство ламп предварительного усиления производят -0.1 вольт на один мегаом сопротивления при условии, что лампа новая. Что сильно ограничивает предел смещения, нам потребуется резистор на 10 мегаом для получения напряжения смещения в -1 вольт!
- Большие значения сопротивления резистора утечки, способны производить блокировочные искажения (смотрите главу 2)
- У этого метода нет таких преимуществ над контролем частотных характеристик как у смещения катода.

Автор: Мерлин Бленков

Пекревод: Ковалев «gaint» Николай

Разработка элементарного триодного каскада:

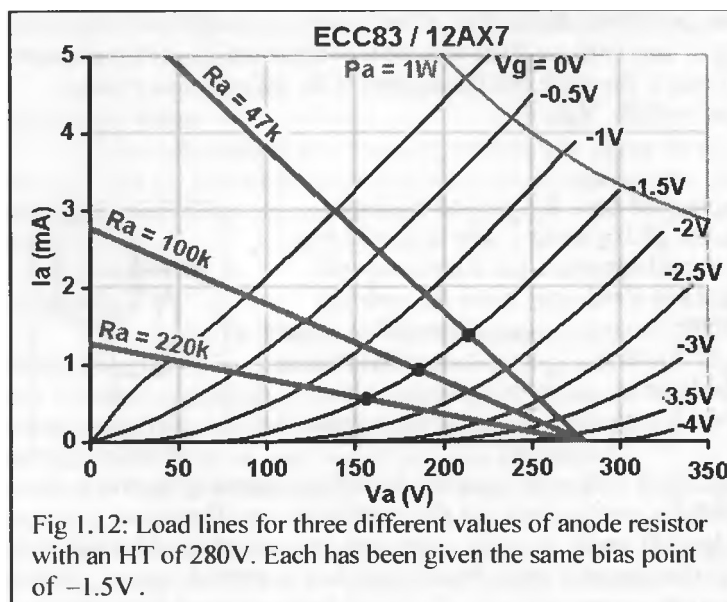
К этому моменту читатель уже должен полностью понимать, каким образом лампа усиливает сигнал, который попадает на ее сетку. Как задавать смещение, в соответствии с анодной нагрузкой и напряжением блока питания. Понимать, как это влияет на ограничение сигнала. Теперь мы можем детально рассмотреть процедуру построения элементарного каскада усиления, с общим катодом и катодным смещением. Использовать мы будем лампу ECC83, так как мы разобрались, что это эталонная лампа для наших целей, при этом наш блок питания будет работать на напряжение 280 вольт.

Выбор анодного резистора:

Для начала нам нужно выбрать анодный резистор. Значение в 100к – общепринятое и самое распространенное. Но давайте рассмотрим, в чем будет разница при выборе других значений резистора.

На рисунке 1.12 показаны статические анодные характеристики для лампы ECC83. На рисунок дополнительно нанесены три линии нагрузки для анодных сопротивлений номиналом: 200к, 100к и 47к. С рисунка видно, что чем ниже сопротивление анодного резистора – тем круче угол линии нагрузки.

Для примера возьмем точку смещения в -1.5 вольт, эта точка соответствует точкам на каждой из линий нагрузок. Можно заметить, что чем выше сопротивление анодной нагрузки, тем больше диапазон выходного сигнала. Например, с нагрузкой в 47к, максимальный выходной сигнал до порога ограничения составляет по амплитуде 125 вольт. Притом, что сигнал с тем же смещением и анодным резистором в 220к будет уже 200 вольт по амплитуде. В каждом из случаев допустимый диапазон



напряжений смещения будет одинаков, поскольку напряжение блока питания одинаковое в любом случае. Легко понять, что коэффициент усиления каскада будет тем больше чем больше сопротивление анодного резистора. По графику можно определить, что КУ каскада будет 42, 55 и 67 соответственно нагрузкам в 47к, 100к и 220к. Тем не менее, если мы сделаем сопротивление резистора слишком большим, мы опустеем линию нагрузки вниз к абсциссе, где анодный ток становится слишком слабым, а кривые сетки начинают сходиться вместе. В этой области производительность каскада становится непредсказуемой, и усиление каскада на самом деле начинает падать. Поэтому в любом каскаде предварительного усиления практически, никогда не используется сопротивление номиналом выше 470к.

Также стоит помнить, что более низкое анодное сопротивление требует большего анодного тока, для заданного смещения, вследствие чего анодом рассеивается больше мощности и анод больше греется. Как видно из рисунка – линия нагрузки для сопротивления в 47к гораздо ближе к кривой максимально допустимого рассеивания, чем линии нагрузки для других, более высоких сопротивлений. Иногда ситуация требует по большому счету токовый выход, чем просто усиление напряжения, в таких случаях нам нужно использовать относительно маленькое значение анодного сопротивления, и

Автор: Мерлин Бленков

Пекревод: Ковалев «gaint» Николай

желательно другую лампу с большим выходным током, например ECC82/12AU7. Для большинства каскадов предварительного усиления, нетипично использование анодного резистора номиналом ниже 10к, во избежание бессмысленной траты энергии, так как каскад с такой слабой нагрузкой имеет крайне низкий КПД и сильно сокращает срок службы лампы.

И наконец, нам нужно исследовать, как анодная нагрузка влияет на искажение сигнала. Используя формулу 2, рассчитаем результат для входного сигнала амплитудой в 3 вольт и смещения в -1.5 вольт, для каждой из анодных нагрузок.

47к: 10% гармонических искажений 2-го порядка.

100к: 7,2% гармонических искажений 2-го порядка.

200к 3,8% гармонических искажений 2-го порядка.

Очевидно, что более низкое значение анодного сопротивления производит больше нелинейных искажений, чем более высокое. По этой причине нагрузку с высоким сопротивлением более предпочтительно применять в хай-фай аппаратуре, за исключением того что большие значения анодного сопротивления вызывают много шумов в сигнале. В гитарном усилителе этого стоит избегать, хотя гармонические искажения и требуют увеличение анодной нагрузки, но все должно быть в меру, некоторое количество четных гармоник дадут нам яркий, стеклянный звук, но увеличение их количества сделают звук слишком визгливым.

Более того, чем больше значение сопротивления анодной нагрузки, тем меньше анодное напряжение для заданного смещения. Это значит, что к тому моменту как лампа начнет ограничивать ток сетки, способность потенциала анода пропускать электроны сквозь сетку снижается, позволяя при этом более мощному току сетки течь мимо. В результате мы получим более раннее ограничение тока сетки, и более жесткую отсечку сигнала, при этом звук будет перегружен жестче и более насыщен гармониками высоких порядков.

По этому, для более теплого, компрессирующего, относительно малогейнового усилителя, допустим усилителя для баса или электроакустической гитары, нам нужно использовать относительно низкоомную нагрузку, такую как 47к. Более хайгейновые усилители потребуют более высокоомную нагрузку, даже больше чем 100к, если мы хотим получить округленный и кристальный звук на большом перегрузе. Для роковых усилителей, нам нужно использовать нагрузку близкую к 100к.

Иногда разработчику приходится использовать достаточно большое значение сопротивления анодной нагрузки, чтобы получить относительно низкое значение статического напряжения на аноде, для заданного смещения. Это редко требуется в гитарных усилителях, за исключением случаев связанных с постоянным током, что будет рассмотрено в конце второй главы. Ну и естественно, что в случае если наш каскад будет работать от источника питания с более низким напряжением, к примеру, 200 вольт, то нам нужно пересчитать и уменьшить и сопротивление анодного резистора.

Выбор катодного резистора смещения:

Будем считать, что мы используем традиционный 100к анодный резистор в нашем каскаде. После того как мы нарисовали линию нагрузки, нам нужно выбрать напряжение смещения которое находится в зависимости между объемом в звуке и отсечкой сигнала, которую мы хотим получить от нашего каскада. Если наш каскад является входным каскадом усилителя, то мы можем выбрать центральное смещение, либо сделать его немного теплее. В этом случае нас устроит напряжение смещения в -1.5 вольт. Теперь можно преступить к выбору катодного резистора.

Смотря на линию нагрузки на рисунке 1.13, мы видим, что смещение в -1.5 вольт приведет к анодному току в 0.9мА. Это тот ток, что течет через лампу в катод и выходит из нее через катодный резистор. Напряжение на сетке зафиксировано и составляет 0 вольт относительно катода, но мы хотим сделать нашу сетку на 1.5 вольт негативнее, чем

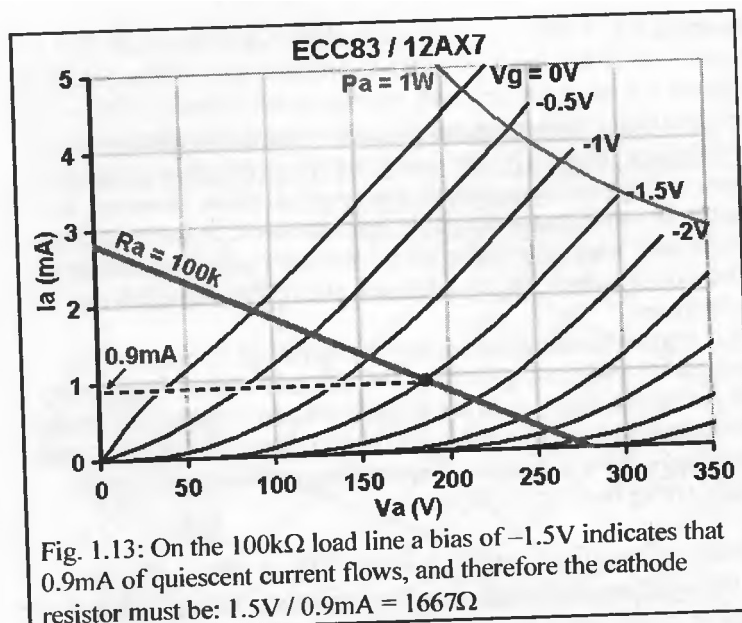
Автор: Мерлин Бленков

Пекревод: Ковалев «gaint» Николай

катод, это значит, что нам надо поднять потенциал катода до +1.5 вольт. Теперь, когда мы знаем какое напряжение, мы хотим получить на катоде, и какой ток будет протекать через катодный резистор, мы можем смело применять закон Ома.

$$R = V/I = 1.5/0.0009 = 1667 \text{ Ом.}$$

К сожалению, это не совсем стандартное значение резистора. Мы, конечно, можем добиться, такого номинала, используя комбинацию из нескольких разных резисторов, Или мы можем признать тот факт, что спецификации указанные производителем на лампу, все равно являются усредненными и в той или иной степени имеют разброс по параметрам. По этому, можно просто выбрать ближайший номинал из стандартных резисторов. В этом случае ближайший коммерческий номинал резистора будет 1.5к. Это сделает наше смещение чуть теплее, что, в общем-то, хорошо.



Линия нагрузки катода:

В случае если мы знаем только значение номинала катодного резистора, можно рассчитать каким будет напряжение смещения при заданном значении резистора, на этот раз мы будем пользоваться **линией нагрузки катода**. Линия нагрузки катода, рисуется аналогично линии нагрузки анода, разница только в том это будет не линия, а кривая, вследствие не идеальных линейных характеристик лампы. Для начала, предположим, что через катодный резистор проходит ток в 1.5mA.

Тогда напряжение на резисторе должно быть:

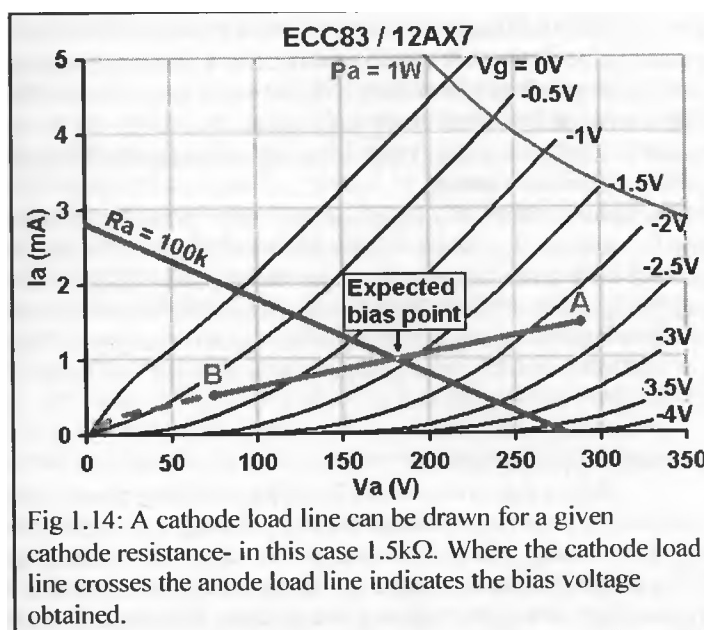
$$\begin{aligned} V &= I \times R \\ &= 0.0015 \times 1500 \\ &= 2.25 \text{ вольт} \end{aligned}$$

Нанесем эту точку на график.
Рисунок 1.14

$$I_a = 1.5mA, V_{gk} = 2.25V \text{ (точка A)}$$

Теперь предположим что ток через резистор 0.5mA:

$$\begin{aligned} V &= 0.0005 \times 1500 \\ &= 0.75V \end{aligned}$$



Нанесем и эту точку на график (точка B), и соединим точки линией. Можно рассчитать дополнительно несколько точек, чтобы детализировать линию, которая должна превратиться в слегка выгнутую вниз кривую, но этой незначительной кривизной можно

пренебречь. Также можно рассчитать и нанести еще несколько нагрузочных кривых катода, полученных при других значениях катодного резистора, для наглядности.

На рисунке 1.14 мы четко видим точку, в которой катодная прямая пересекает анодную прямую. Эта точка указывает на напряжение смещения катода, при заданном номинале резистора. Как мы видим, в данном случае потенциал катода будет -1.4 вольт, что очень близко -1.5 вольт, которые мы хотели получить, напряжение вышло слегка меньше за счет того что мы взяли резистор коммерческого номинала на 1500 Ом, что на 167 Ом меньше расчетного.

В будущем, вследствие прохождения сигнала, среднее значение анодного тока текущего через лампу слегка увеличится, по причине нелинейности переходных характеристик, по этому напряжение смещения может стать еще ближе к расчетному!

Как правило, на практике нет никакой надобности рисовать линию нагрузки катода, так как ближайшие из стандартных номиналов сопротивлений по отношению к расчетным, нас вполне устроят. Но такая необходимость может возникнуть в случае с выходными лампами, так как там точное напряжение смещение более критично.

Выбор сеточного резистора утечки:

Во время своей работы, сетка начинает разогреваться (так как она ближе к катоду и соответственно нитям накала) и начинает излучать электроны. По этой причине сетка начнет позитивно заряжаться, до тех пор, пока ей не обеспечат путь для слива избытка заряда. Если дать сетке возможность позитивно заряжаться, то анодный ток начнет расти, что подымет температуру лампы, а это сделает ситуацию еще хуже. В результате точка смещения уедет со своей позиции. На практике по отношению к выходным лампам это может вызвать покраснение анода, термический перекося параметров и физическое разрушение лампы. Резистор утечки, предоставляет необходимый путь для избытка электронов, которые смогут стекать из сетки в катод через резистор, и держать сетку жестко на заданном потенциале (в нашем случае на 0 вольт). В современной терминологии такой резистор называется оттягивающим резистором.

Конечно, мы заинтересованы в том, чтобы взять резистор утечки номиналом побольше, чтобы он не препятствовал переменному сигналу замыкая его на землю. Тем не менее, есть максимально допустимое значение сопротивления сеточного резистора утечки, и оно указано в спецификациях к лампе. Для ECC83 это значение составляет 2 мегаома, но допускается использование резистора вплоть до 22 мегаом, при условии, что анодный ток не превышает 5 миллиампер. Практически во всех устройствах используется резистор номиналом 1 мегаом, и этот номинал считается стандартным значением сеточного резистора. Большинство ламп каскадов предварительного усиления будут работать с большими номиналами сеточного резистора, но опять же в случае если они работают на пониженном анодном токе (меньше 5мА). Но в остальных случаях нет смысла использовать резистор номиналом больше чем 1 мегаом, так как большее сопротивление увеличит шумность каскада, при этом особой пользы не добавит.

Значение сопротивления сеточного резистора для выходных ламп в основном приводятся для двух условий, одно для фиксированного смещения, другое для смещения катода. Дело в том, что при смещении катода, из-за сдерживающего эффекта катодного резистора, анодный ток не может увеличиться до такой значительной степени, чтобы началось термическое разрушение. Что нельзя сказать про фиксированное смещение. В любом случае, поскольку любой заряд, что накопился на сетке выходной лампы легко слить, то для этого нам не потребуется резистор слишком большого сопротивления.

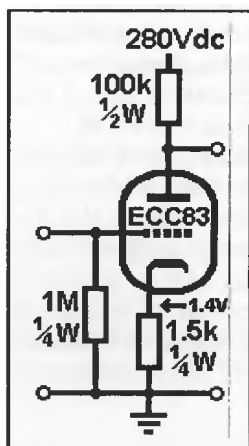
Расчет номинальной мощности:

Перед тем как собирать цепь, необходимо рассчитать номинальную мощность каждого компонента цепи. Если резистор будет недостаточной мощности, он начнет греться, что вызовет перекося характеристик, либо вообще его отказ функционировать дальше, иногда вызывая возгорание! В случае с анодным резистором, мы знаем благодаря линии нагрузки, что средний анодный ток через резистор будет 1мА. Мощность рассеивания резистора должна быть:

$$\begin{aligned} P &= I^2 \times R \\ &= 1^2 \times 100 \\ &= 100\text{mW} \end{aligned}$$

Чтобы обеспечить надежную работу и долгий срок службы, хорошим тоном считается брать запас мощности элемента в два или даже более раз. Так что резистора на ¼ ватт хватит с головой. Но как правило маломощные резисторы рассчитаны на относительно низкое напряжение, как правило 250 вольт, это максимальное напряжение которое можно приложить к резистору до того как он может испортиться, это зависит от физической конструкции резистора. Так что в данном случае стоит взять резистор мощностью 0.5 – 1 ватт, в качестве анодной нагрузки.

Катодный резистор пропускает через себя крайне малое напряжение, и он рассеет



только 1.5mW, и даже в случае если лампа каким-то образом сможет превысить максимально допустимый ток в 2.8мА, мощность никогда не превысит значение 11.8mW, так что четверти ватта нам вполне хватит.

В нормальных условиях через резистор утечки вообще не проходит постоянный ток, кроме случаев отсечки по постоянному току. Так что только напряжение сигнала, может вызывать какое либо рассеивание мощности на резисторе. И даже чтобы рассеять на резисторе четверть ватта, потребуется сигнал в $\sqrt{0.25\text{ W} \times 1\text{M}\Omega} = 500\text{ Vrms}$. По этому нас может волновать только допуск по напряжению для резистора утечки. Максимально возможный пик сигнала в любой части усилителя не может быть выше половины напряжения питания, в нашем случае (140 вольт), так что четверть ватт – то, что надо.

Большинство предварительных усилителей состоят полностью из 0.5 ваттных резисторов, кроме цепей питания. Можно использовать и более мощные резисторы, и это поможет уменьшить тепловые шумы в усилителе. Многие усилители высокого класса построены полностью 1-но ваттных или даже 2-х ваттных резисторов, как правило, физически такие усилители больше, как и резисторы, а за счет больших габаритов элементов, можно добиться благородного, винтажного вида конструкции. Проволочные, метал оксидные и металлопленочные резисторы, как правило, самые малошумящие, но считается что они наиболее стерильные в звуке. Углеродистые резисторы наиболее распространены, они хоть и выделяют больше шума в звук, но и звучат более «спело». Старые, угольно композитные резисторы, являются самыми шумными из всех, и их номинал постоянно плывет в ту или другую сторону. Это делает их неприменимыми в современных усилителях, но поскольку изменение их сопротивления зависит от приложенного к ним напряжения, это заставляет их выделять в сигнал небольшое количество гармоник 3-го порядка, и слегка компрессировать звук. Поэтому эти резисторы весьма желательны в винтажных чистых усилителях, где такой тепловой шум допустим с точки зрения звучания.

Постоянные данные вакуумной лампы:

Автор: Мерлин Бленков

Перевод: Ковалев «gaint» Николай

Теперь мы знаем, что слабые изменения V_{gk} , Вызывают изменения анодного тока. Это один из фундаментальных свойств усилительной лампы, и это одна из трех «Постоянных», которые можно использовать, чтобы получить ожидаемую производительность лампы в заданной схеме. Эти постоянные уникальны для каждого типа ламп, и их точные значения можно узнать из спецификаций производителя на конкретную лампу. Но их можно выяснить и из графика анодных характеристик.

Транс проводимость (g_m):

Способность лампы переносить небольшой заряд электричества через ток, известна как **взаимная проводимость** или **транс проводимость**. Обозначается символом g_m и измеряется в **миллисименах**, или **миллиамперах на вольт**, или mA/V . Это значение можно определить из графика анодных характеристик, приняв анодное напряжение за постоянную, другими словами поведя вертикальную линию через рабочую точку А на рисунке 1.15. теперь нужно вывести изменение значения I_a , при небольшом изменении в значении V_{gk} . В нашем случае меняя V_{gk} с -1 до -2 вольт (изменение на 1 вольт) получаем изменения в I_a на $1.7-0.3=1.4mA$.

Отсюда находим g_m :

$$g_m = \frac{\Delta I_a}{\Delta V_{gk}} = \frac{1,4}{1} = 1,4mA/V \text{ или } 1.4mS$$

Фактор усиления (μ):

Когда нагрузка подключена последовательно лампе, небольшие изменения V_{gk} вызывают заметные изменения V_a . И это значение достигает своего максимума, когда анодный ток становится абсолютно неизменным. Это условие – теоретически максимальное усиление каскада. Обозначается символом μ (ню). Значение также можно определить из анодных характеристик, но теперь проводя горизонтальную линию от рабочей точки, и определить, как влияет изменение V_a на значение V_{gk} . В нашем случае меняя V_{gk} с -1 до -2 вольт получаем изменения в V_a на $240-140=100$ вольт.

Вычисляем μ :

$$\mu = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_{gk}} = \frac{100}{1} = 100$$

Этот параметр не имеет размерности, это просто фактор усиления.

Сопротивление анода (r_a):

И наконец, если напряжение смещения достигло постоянной величины, то любые изменения V_a повлияют на значение I_a . Сопротивление, которое лампа оказывает

переменному току, называется **сопротивлением анода** r_a . Эта величина эквивалентна

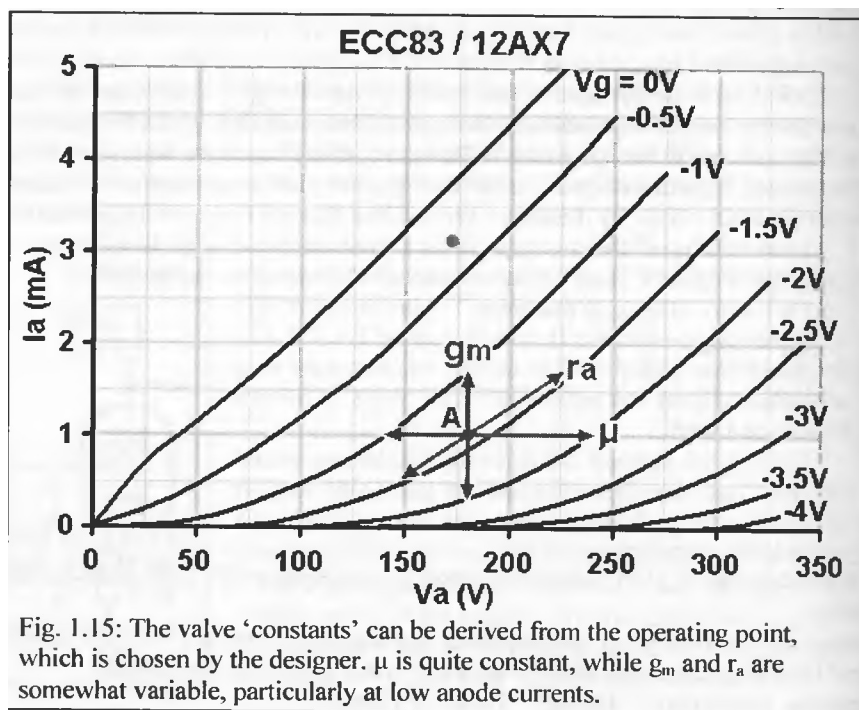
обратному градиенту кривых сетки. Более того, чем круче характеристика кривых сетки, тем ниже сопротивление анода у лампы. Становится очевидным, что чем холоднее выставлено смещение лампы, тем крутизна характеристики кривых меньше и тем больше сопротивление анода. Это немного отличается от сопротивления лампы по постоянному току, так же известному как лучевое сопротивление, которое зависит исключительно от положения рабочей точки в заданный момент времени, и контроль над лучевым

сопротивлением не подвластен разработчику. Чтобы определить r_a , необходимо знать градиент кривых сетки, который естественно не постоянный, так как это кривые. Но такой градиент можно определить, если нарисовать касательную к кривой сетке, которая находится ближе всего к рабочей точке, и определить, как влияет изменение I_a на

значение V_a . В нашем случае получаем изменения в V_a на $225-150=75$ вольт. В свою очередь изменения в I_a составляют $1.65-0.6=1.05$ мА.

Отсюда узнаем сопротивление анода:

$$r_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} = \frac{75}{1.05} = 71k\Omega$$



Значение всех этих констант для конкретной лампы вы сможете найти в спецификациях производителя, но по причине того что кривые сетки не прямые, и расположены не равномерно, r_a и g_m не являются постоянными. Но, тем не менее, для всех «обычных» точек смещения, они всегда будут очень близки к значениям указанным производителем, за исключением, пожалуй, некоторых очень не линейных триодов, таких как ECC85. Сознательный разработчик, так или иначе, будет выводить свои значения, в зависимости от точки смещения, которую он решил использовать, вместо использования общих значений констант указанных в спецификациях. Общедоступные значения констант для лампы ECC83 соответственно спецификациям, такие: $\mu=100$, $r_a = 62,5k\Omega$, $g_m = 1.6mA/V$ при анодном напряжении 250 вольт, что не сильно отличается от наших расчетов, но тем, ни менее указывает на, то, что наша точка смещения не совпадает с точкой, по которой рассчитывали данные в спецификации производителя.

Математические расчеты усилительного каскада:

Теперь, когда мы собрали наш каскад, и можем вычислить μ , r_a и g_m из линии нагрузки, можно исследовать производительность каскада более внимательно. Метод расчета ожидаемого усиления, используя линию нагрузки, был дан выше, но это не самый удобный способ сделать это. Более того, после внедрения катодного резистора, мы изменили усиление каскада, и теперь точное значение КУ каскада нельзя узнать из линии

нагрузки. Было бы удобно иметь набор уравнений, которые бы ускорили процесс разработки.

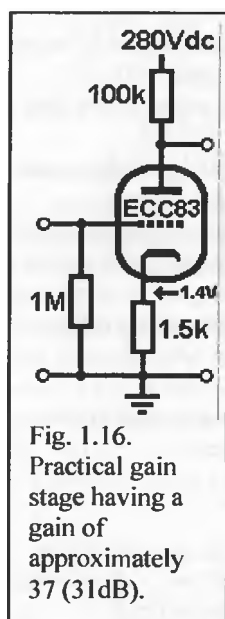
Самый простой способ проанализировать каскад усиления, это представить лампу идеальным усилителем, коэффициент усиления которого равен μ . Этот усилитель, заставляет течь сигнальный ток через последовательную комбинацию R_a , r_a и других сопротивлений, которые могут присутствовать на пути. Эти сопротивления в своей совокупности образуют делитель напряжения. Если мы снимаем наш сигнал через R_a , тогда усиление делителя напряжения β , найти очень просто – $R_a/(R_a + r_a)$. В этом случае усиление напряжения такого резистивно-нагруженного триодного каскада с общим катодом, находится по формуле:

$$A = \frac{-\mu * R_a}{R_a + r_a}$$

Минус в данном выражении обычно опускается, так как знак указывает исключительно на фазу сигнала. Значит, если мы проигнорируем R_k , то можно легко вычислить КУ такого каскада как на рисунке 1.16:

$$A = \frac{100 * 100k}{100k - 70k} = 58$$

Но, R_k можно игнорировать только в том случае, когда через него не течет ток сигнала, а



это возможно только в случаях, когда напряжение смещения катода не меняет своего значения, а по рисунку 1.16 видно, что это, ни так. Когда мы подаем входной сигнал на сетку, то анодный ток будет изменен, и поскольку этот ток течет через R_k , то напряжение на катоде тоже изменится. Например, если напряжение на сетке вырастет на 1 вольт, то анодный ток возрастет, соответственно возрастет и катодное напряжение, на какое-то небольшое значение. В результате изменение напряжения V_{gk} будет не 1 вольт, а немного меньше. Если же сетку сделать более негативной, то ситуация будет с точностью да на оборот. Поскольку катодное напряжение стремится к сеточному напряжению, а лампа усиливает только изменения V_{gk} , то и выходное напряжение будет меньше, чем мы рассчитываем. Этот феномен известен как **обратная связь по катодному току**. Такая обратная связь вызывает снижение ожидаемого усиления и нелинейных искажений каскада, при этом увеличивает выходное сопротивление.

Поскольку лампа усиливает разницу напряжений между сеткой и катодом, любое сопротивление, подключенное последовательно катоду, обязательно повлияет на усиление. Поэтому усиление каскада с катодным резистором надо рассчитывать, немного по другой формуле:

$$A = \frac{\mu * R_a}{R_a + r_a + R_k(\mu + 1)}$$

Поскольку мы разобрались раньше, что μ в нашем случае равно 100, отсюда:

$$A = \frac{100 * 100 k}{100 k + 70 k + (1k * 101)} = 36,9$$

Это заметно меньше того что мы рассчитали до этого, игнорируя катодный резистор. Так что такой каскад очень хорошо подходит для чистого усилителя, по причине того что каскад будет сложнее перегрузить, и сам по себе каскад не будет ограничивать сигнал.

Но теперь у нас встает другая задача. Нам нужно добиться как можно большего усиления от каскада, для этого нам нужно избежать воздействия входного сигнала на изменения катодного напряжения. Для этого мы вводим новый важный элемент.

Катодный шунтирующий конденсатор:

Добавляя конденсатор в параллель катодному резистору, как показано на рисунке 1.17, мы добьемся того, что любое мгновенное увеличение катодного тока, будет перенаправлено на зарядку конденсатора, который заберет на себя избыток, при этом если вдруг катодный ток упадет – то конденсатор отдаст свой заряд. Так же конденсатор будет шунтировать переменный сигнал на катоде, и этот сигнал не будет попадать в катодный резистор, при этом напряжение смещения будет неизменным. В результате добавления одного конденсатора мы получаем массу преимуществ: Шунтирующий конденсатор сглаживает изменения в катодном напряжении, помогая этому напряжению оставаться неизменным, предотвращает катодную обратную связь и помогает достичь максимального усиления каскада. Катодный резистор также влияет на характеристики искажения сигнала каскадом. Без него, катодная обратная связь оттягивает, тормозит наступление начало порога ограничения сетки, делая звук более сглаженным и компрессированным. Добавление конденсатора убирает обратную связь, ограничивая сигнал жестче, делая звук более агрессивно перегруженным.

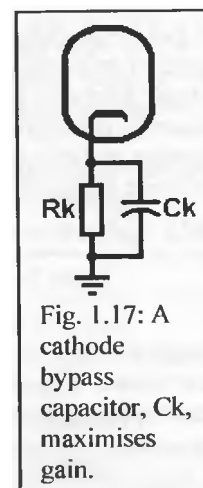


Fig. 1.17: A cathode bypass capacitor, Ck, maximises gain.

Конечно, на высоких частотах конденсатор потребует большего тока, чем на низах. И если мы хотим получить от нашего каскада максимум усиления на всех частотах, то конденсатор должен быть достаточно емким, чтобы сглаживать низкие частоты. Такой каскад называется полностью зашунтированным.

Если емкость будет слишком мала, то сглаживаться будут только высокие частоты, а низы не будут. В этом случае каскад будет иметь максимальное усиление по высоким частотам и минимальное усиление по низам. Такой каскад даст нам поднятие высоких частот (Treble boost), и будет называться частично зашунтированным.

Если у каскада вообще нет катодного конденсатора, такой каскад будет называться не зашунтированным, и будет иметь минимальное усиление по всем частотам.

Мы видим тесную взаимосвязь между усилением каскада, его частотным диапазоном, и емкостью катодного конденсатора. Из формул данных выше мы знаем, каким будет минимальный и максимальный КУ каскада. Но это касается предельных значений каскада, расчет значения КУ, которое лежит между минимумом и максимумом не столь очевиден. Вот формула расчета КУ каскада для любой заданной частоты:

$$A = \frac{-\mu * R_a}{R_a + r_a} * \frac{1 + (2 * \pi * f * R_k * C_k)}{\sqrt{\left[1 + \frac{R_k * (\mu + 1)}{R_a + r_a}\right]^2 + (2 * \pi * f * R_k * C_k)^2}}$$

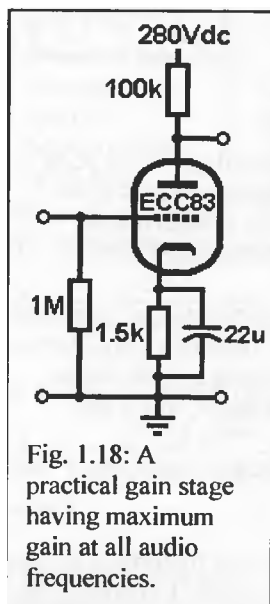
Честно говоря, это выражение слишком громоздкое и неудобное в практическом использовании. К счастью, результат сглаживания частот триодным каскадом всегда предсказуем, так как такой каскад является фильтром первого порядка (рисунок 1.19). Так

Автор: Мерлин Бленков

Пекревод: Ковалев «gaint» Николай

что нам нет надобности, рассчитывать усиление для каждой частоты. Мы просто определим частоту, на которой усиление будет усредненным между максимальным и минимальным КУ. Такая частота называется частота среднего усиления, и мы можем ее определить:

$$f_{(halfboost)} = \frac{1}{2 * \pi * Rk * Ck} * \sqrt{1 + \frac{Rk * (\mu + 1)}{2(Ra + r_a) + \frac{1}{2} * Rk(\mu + 1)}}$$



Поскольку выражение все еще громоздкое и сложное для быстрых расчетов, мы можем его упростить для каскадов с теплым смещением, а у нас именно такой. В случае если $Ra + r_a$ больше чем $Rk(\mu + 1)$ формулу можно очень сильно упростить. Расчет частоты среднего усиления для таких условий, примет вид:

$$f_{(halfboost)} \approx \frac{1}{2 * \pi * Rk * Ck}$$

На самом деле реальная частота среднего усиления будет немного ниже, чем по упрощенному расчету. Поэтому чтобы посчитать емкость катодного конденсатора, для каскада с полным шунтированием мы возьмем опорную частоту, которая хорошо вписывается в диапазон аудио частот, например 5 килогерц. Попробуем рассчитать такой конденсатор:

$$Ck = \frac{1}{2\pi * 1,5k * 5} = 21 \mu F$$

Ближайший коммерческий номинал - $22 \mu F$. С таким конденсатором мы сможем добиться КУ в 58, на всех частотах. Готовая схема рассчитанного нами каскада показана на рисунке 1.18, и читатель может заметить схожесть нашего каскада с входным каскадом усилителя Fender Bassman.

Поскольку $22 \mu F$ это достаточно большая емкость, нам, скорее всего, придется использовать электролитический конденсатор. Так как на катоду бывает всего пару вольт, разработчики усилителей предпочитают конденсаторы, рассчитанные на 25 вольт. К сожалению, электролитические конденсаторы имеют ряд неприятных свойств. У них ограниченный срок службы, высокое эквивалентно-последовательное сопротивление (ESR). В случае, если электролит, работает на постоянном напряжении, которое гораздо ниже предельного, или на значительном переменном напряжении (достаточно нескольких сотен милливольт), он выделяет низкочастотные искажения. На звуке это будет проявляться как рыхлость и подавленность на низких частотах. Другая проблема использования катодных конденсаторов большой емкости, связана с тем, что каскад может дать слишком большое усиление по нижним частотам. Если наш каскад начнет перегружать слишком низкими частотами следующий каскад, это может вызвать блокировочные искажения (смотрите 2-ю главу), которая нежелательна. Это по большей степени касается басовых усилителей, но в любом усилителе с несколькими каскадами эффект будет совокупным. Все это дает нам возможность задуматься об альтернативных решениях. Вот несколько вариантов:

- Использовать конденсаторы на более низкий вольтаж, к примеру, 6,3 вольта. Это кое-как поможет избежать искажений на низких частотах, но, как правило, низковольтные конденсаторы имеют бедный допуск по емкости и иногда высокое эквивалентное сопротивление, что может испортить наш каскад.
- Использовать чрезмерно большие по емкости электролитические конденсаторы, например $100\ \mu F$, чтобы уменьшить крутизну частотных искажений, но, к сожалению это вызовет блокировочные искажения, и помешает нам использовать катод для частотного сглаживания.
- Использовать неполярные электролиты. Такие конденсаторы не требуют обязательного выпрямленного тока, и однозначно во многом выигрывают в сравнении с недостатками обычных электролитов. Но такие конденсаторы, как правило, доступны в очень ограниченном диапазоне номиналов.
- Использовать не электролитические конденсаторы, такие как полипропиленовые или серебряно-слюдяные. Это даст наилучший звук, но поскольку такие конденсаторы редко бывают номиналом выше, чем $1\ \mu F$, применять их в гитарных усилителях затруднительно.

Многие ранние усилители, использовали довольно емкий катодный конденсатор, по причине того что они состояли из небольшого числа каскадов, и в те годы подразумевалось что никто не будет перегружать такие усилители. Например, 50-ти ватный Marshall Master Volume использовал $330\ \mu F$ в одном из своих каналов! Со временем гитарные датчики эволюционировали и стали более мощными (современный мощный хамбакер может обеспечить сигнал амплитудой в 4 вольта.), стало важным, чтобы низкие частоты усилителя были упругими и детализированными даже в режиме перегруза. В результате многие усилители начали использовать менее емкие катодные конденсаторы. Наиболее популярные, хорошо спроектированные современные усилители используют частичное шунтирование в комбинации с небольшим проходным конденсатором (смотрите 2-ю главу), получая, таким образом, кристальный, тягучий на высоких нотах перегруз, с совершенно не мутным басом. Это говорит нам о том, что для хорошего гитарного звука, нам не нужно большое усиление по низким частотам. Так что, чтобы улучшить звучание усилителя, который звучит слишком мутно, достаточно для начала, уменьшить емкость катодных конденсаторов, это самый безопасный и дешевый путь для экспериментов. Более того, меньшая емкость конденсатора, позволяет использовать более качественные неполярные конденсаторы, которые имеет лучший допуск по емкости, меньшее эквивалентное сопротивление, и практически неограниченный срок службы. Но по возможности входной каскад усилителя должен быть с полным шунтированием, для того чтобы отсечь тепловой и силовой шум.

На рисунке 1.19 показаны частотные характеристики каскада при разных значениях катодного

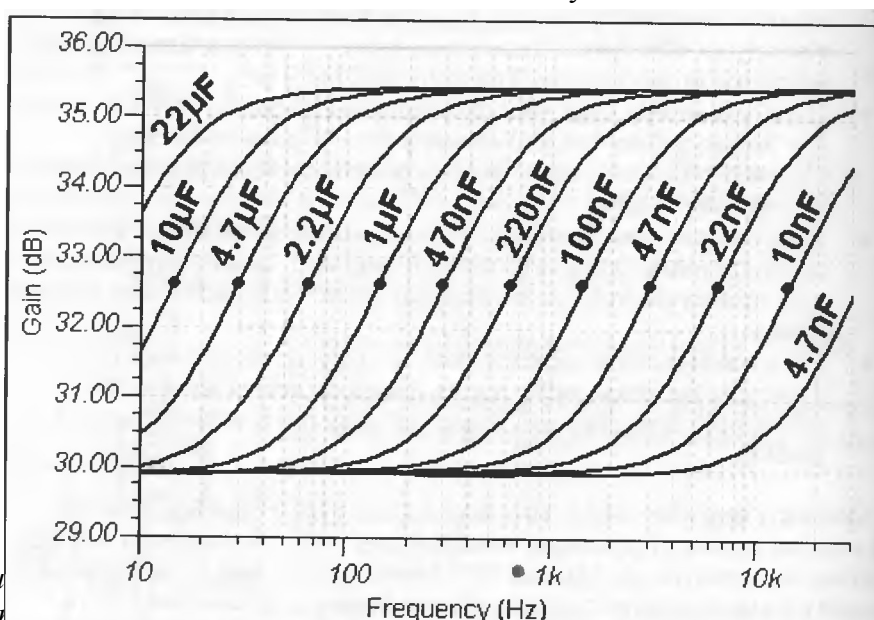


Fig. 1.19: Frequency response of the circuit in fig. 1.18 for different possible values of cathode bypass capacitor.

конденсатора. Точками указаны опорные частоты для соответствующих значений катодного конденсатора.

Другие способы шунтирования катода:

В некоторых ситуациях разработчик захочет использовать частичное шунтирование, но с меньшим углом усиления. Это легко сделать, добавляя ограничивающий резистор последовательно катодному конденсатору, в этом случае даже высокие частоты не будут полностью шунтированы на землю через катодный конденсатор.

Например, на рисунке 1.20а, показан типичный каскад, в котором R1 – это ограничительный резистор. Для низких частот катод абсолютно не зашунтирован, значит, каскад будет иметь минимальное усиление. Мы можем его посчитать по методике использованной ранее:

$$A = \frac{100 * 100 k}{100 k + 62 k + (1k * 101)} = 38$$

(Значение сопротивление анода упало до 62 Ом по причине того что смещение каскада стало более теплым по отношению к каскаду на рисунке 1.18). На высоких частотах, катодный конденсатор емкостью в $1 \mu F$ шунтирует катодный резистор, но ограничительный резистор в 1к предотвращает полное шунтирование. Поскольку ограничивающий резистор подключен параллельно катодному резистору, общее эффективное сопротивление катода будет 500 Ом, и максимальное усиление каскада будет:

$$A = \frac{100 * 100 k}{100 k + 62 k + (0,5k * 101)} = 47$$

С точки зрения переменного тока, оба резистора подключены последовательно конденсатору, и их сопротивление будет 2к по отношению к сигналу, так что средняя частота усиления будет:

$$f_{(halfboost)} \approx \frac{1}{2\pi * 2000 * 1 * 10^{-6}} = 80Hz$$

Хорошей модификацией схемы на рисунке 1.20а, будет замена ограничивающего резистора на потенциометр (подключенного как реостат) Рисунок 1.20б, это поможет нам сделать усиление регулируемым. Если емкость катодного конденсатора мала, то такая регулировка станет усилением высоких частот, или

Автор: Мерлин Бленков
Перевод: Ковалев «gaint» Николай

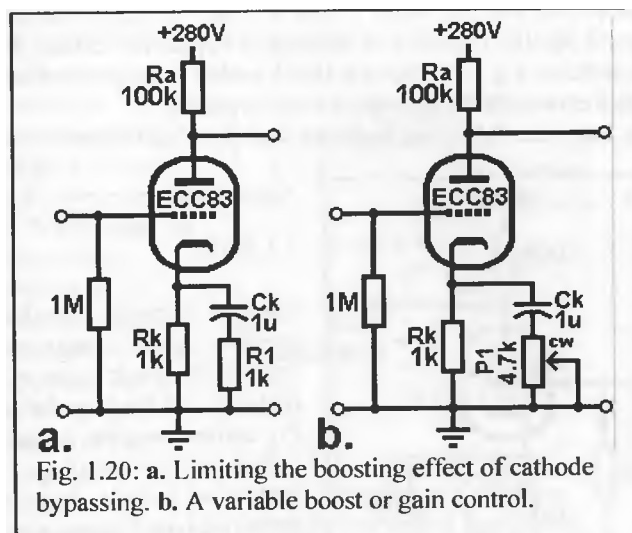


Fig. 1.20: a. Limiting the boosting effect of cathode bypassing. b. A variable boost or gain control.

регулировкой презенса (Presence), в этом случае лучше использовать потенциометр с линейной характеристикой. Если же конденсатор будет более емким, мы получим регулировку общего усиления, гейн (Gain), и тут больше подойдет потенциометр с логарифмической характеристикой. Поскольку конденсатор отсечет постоянный ток от потенциометра, при регулировках не будет никаких неприятных призвуков.

На рисунке 1.21 показана реальная частотная характеристика для обоих случаев. Средняя кривая показывает условия при 20% угле поворота ручки потенциометра, что также соответствует условиям с постоянным резистором.

Поскольку полное усиление каскада на рисунке 1.20а не было достигнуто, мы можем добавить в схему второй конденсатор небольшой емкости, чтобы полностью зашунтировать катод на высоких частотах. На рисунке 1.22 мы добавили в схему конденсатор на 100нФ, и теперь катод полностью зашунтирован на очень высоких частотах.

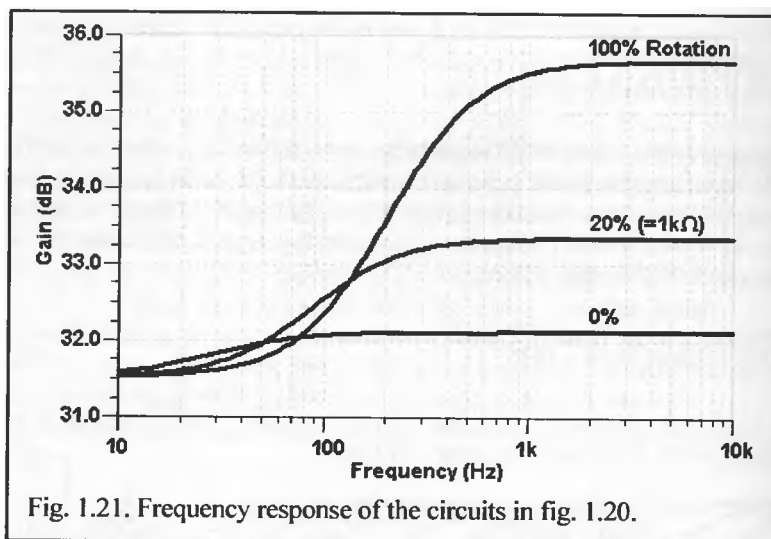


Fig. 1.21. Frequency response of the circuits in fig. 1.20.

Средняя частота между частичным и полным усилением будет:

$$f_{(halfboost)} \approx \frac{1}{2\pi * 1000 * 100 * 10^{-9}} = 1.6kHz$$

На рисунке 1.23 показано как добавление второго конденсатора повлияло на частотные характеристики каскада. Теперь полное усиление каскада достигнуто на очень высоких частотах, и наш каскад обладает ступенчатым усилением по верхам. Для сравнения точечной линией указана частотная характеристика каскада без модификации.

Можно добиться и более сложного, общего шунтирования. Во многих ламповых телевизорах, использовались очень сложные цепи шунтирования катода. Они были нужны для отделения аудио сигнала от видео. Но для разделения частот аудио сигнала, более чем достаточно такого каскада как указан на рисунке 1.22. И не забываем, что ограничительный резистор может быть заменен на потенциометр.

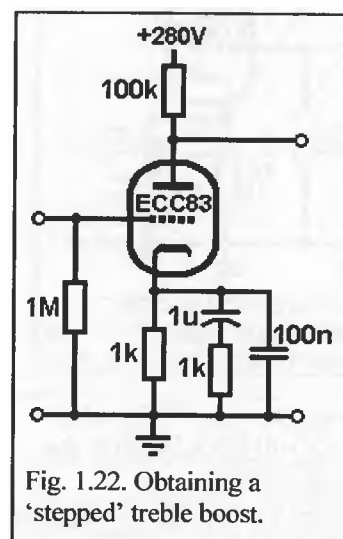
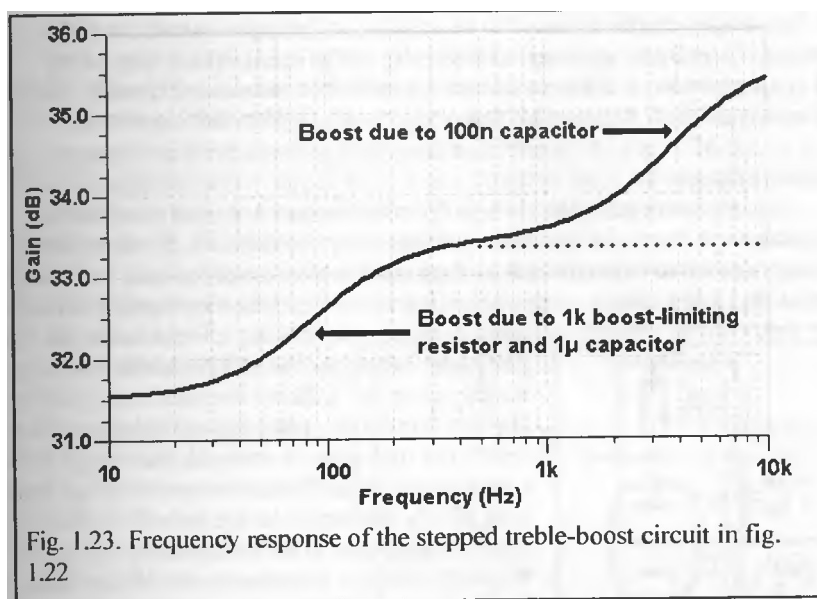


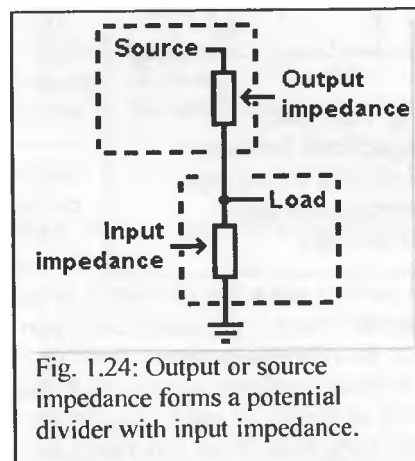
Fig. 1.22. Obtaining a 'stepped' treble boost.



ВЫХОДНОЙ

В случаях, когда одна цепь, соединена или связана с другой, важно знать какое воздействие будет на цепи, которая начинает нагружаться, или на цепи, которая может перегрузиться. В предварительном усилителе, нас в основном интересуют амплитудные сигналы переменного напряжения. На рисунке 1.24 показано как входной импеданс нагружаемой цепи при нагрузке входного импеданса создают делитель. В случае если входной импеданс цепи низкий по сравнению с выходным импедансом предыдущей цепи (в таких случаях принято говорить импеданс источника), это приведет к потере в напряжении сигнала. Другими словами, в следующий каскад попадет меньшее количество полезного сигнала. Для лучшей передачи сигнала нам нужно чтобы входной импеданс был больше чем импеданс источника (обычно как минимум в 5 раз больше). Это называется **согласованием импеданса** или **согласованием сопротивлений**.

Входной и импеданс:

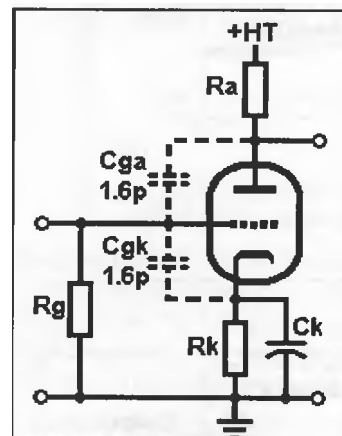


Входной импеданс:

Поскольку сетка внутри оболочки лампы, находится в вакууме, она не должна потреблять ток при нормальных условиях, кроме случая сеточного ограничения. Поэтому входной импеданс сетки на низких и средних частотах может считаться бесконечным, поэтому входной импеданс всего каскада задается резистором утечки, это может быть любое значение, при условии, что оно не превышает допустимый максимум. Обычно это 1 мегаом.

Эффект Миллера:

На высоких частотах ситуация несколько иная, нам нужно взять во внимание паразитные емкости которые существуют между электродами лампы, более известные как **межэлектродные емкости** которые указаны в спецификациях производителя. Кажется что все просто, нужно элементарно подсчитать все эти емкости вместе, и



получить общую входную емкость. Не все не так просто. Паразитные емкости из спецификаций на лампу ECC83 указаны на рисунке 1.25.

Поскольку сигнальное напряжение на аноде – это усиленная по амплитуде версия напряжения на сетке, то напряжение на емкости C_{ga} , гораздо больше, чем на C_{gk} . Это позволяет значению C_{ga} усиливаться вместе с общим усилением каскада. Такое поведение известно как **эффект Миллера**, и общая входная емкость рассчитывается так:

$$C_{in} = C_{gk} + C_{ga} * A$$

Где:

C_{gk} – паразитная емкость сетка-катод

C_{ga} – паразитная емкость сетка-анод

A – Усиление напряжения каскада.

В нашем случае, усиление каскада указанного на рисунке 1.18 мы уже считали, и получили значение 58. Так что можем, смело искать общую входную емкость.

$$C_{in} = 1.6 * (1.6 * 58) = 94.4 \text{ pF}$$

Обычно значения округляют, добавляя несколько пикофард, так как на практике эти несколько пикофард появятся за счет паразитного сопротивления между контактами лампы и ламповой панелькой на шасси, так что округлим полученную цифру до 100pF. Эта емкость, вместе с входным импедансом, образуют низкочастотный фильтр, который будет гасить высокие частоты, пока ток не изменит входную емкость. На самом деле этот эффект даже полезен в гитарном усилении, и им даже можно управлять, манипулируя точкой при которой частоты начнут «сворачиваться», но к этому мы еще вернемся во 2-й главе. В некоторых хайгейн усилителях, разработчики даже добавляют в некоторых каскадах небольшой конденсатор между анодом и сеткой, чтобы искусственно увеличить C_{ga} , ослабляя, таким образом, высокие частоты и в тоже время делая их более линейными, так как такой конденсатор создает локальную негативную обратную связь (подробнее в 9-й главе). Таким образом, добиваясь более округлого звука на высоких частотах.

Выходной импеданс:

Выходной импеданс каскада, становится импедансом источника для цепи, на которую он нагружен. Поэтому важно знать его значение, чтобы подобрать подходящий входной импеданс следующего каскада. На практике это очень важно в случаях, если выход каскада будет подан на мощную нагрузку, например на тембр блок. На рисунке 1.26 показана эквивалентная цепь Тевенина, эта цепь точно также как и цепь на рисунке 1.18 работает на переменное напряжение. На рисунке, триодная лампа была заменена на идеальный генератор сигнала, подключенный последовательно с резистивной нагрузкой,

r_a , эта нагрузка работает как сопротивление

анода в лампе. Такой вид упрощения, при помощи математической модели, незаменим в вопросах цепей переменного тока связанных с проблемами согласования входного и выходного импеданса. В случае если катодный резистор зашунтирован, это шунтирует и всю цепь по переменному току. В этих условиях с рисунка 1.26а видно, что общее сопротивление, которое нужно преодолеть цепи чтобы достичь выхода, состоит из параллельной

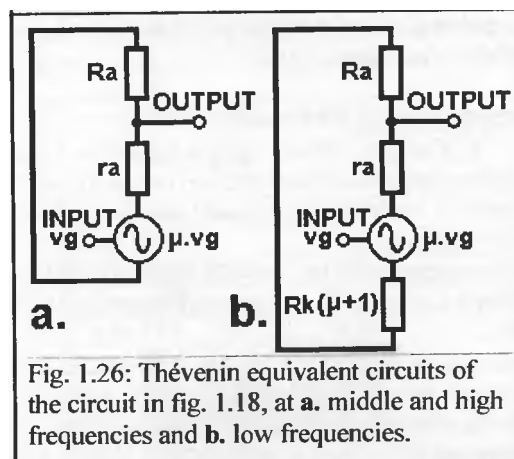


Fig. 1.26: Thévenin equivalent circuits of the circuit in fig. 1.18, at a. middle and high frequencies and b. low frequencies.

комбинации R_a и r_a , теперь мы можем рассчитать выходной импеданс для зашунтированного катодного резистора:

$$Z_{out_{(Rk_bypassed)}} = R_a \parallel r_a$$

Ранее нами было рассчитано, что r_a в нашем случае составляет 70 Ом, отсюда:

$$\begin{aligned} Z_{out_{(Rk_bypassed)}} &= 100k \parallel 70k \\ Z_{out_{(Rk_bypassed)}} &= \frac{100k * 70k}{100k + 70k} = 41k\Omega \end{aligned}$$

В случае если катодный резистор не зашунтирован, что и будет на очень низких частотах, тогда цепь примет вид как на рисунке 1.26b. Теперь R_k подключен последовательно r_a . Поскольку R_k относится к катоду, его значение умножается на $\mu+1$. Теперь мы можем составить формулу для расчета выходного импеданса, в случае если катод не зашунтирован:

$$Z_{out_{(Rk_unbypassed)}} = R_a \parallel (r_a + R_k * (\mu + 1))$$

В нашем случае $R_k=1,5k$, $\mu=100$, Считаем:

$$\begin{aligned} Z_{out_{(Rk_unbypassed)}} &= 100k \parallel (70k + 1,5k * (100 + 1)) \\ Z_{out_{(Rk_unbypassed)}} &= 100k \parallel 251,5k \\ Z_{out_{(Rk_unbypassed)}} &= \frac{100k * 251,5k}{100k + 251,5k} = 72k\Omega \end{aligned}$$

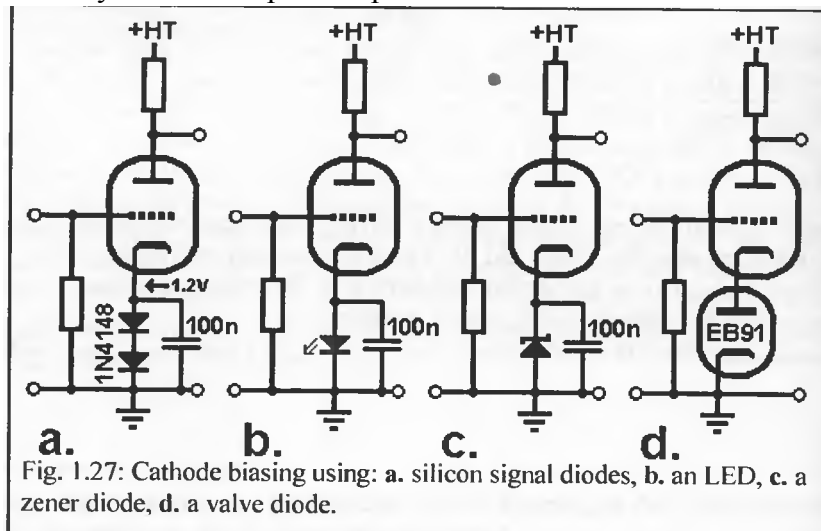
Все это четко показывает, что не зашунтированный катодный резистор, значительно увеличивает выходной импеданс. В случае если каскад зашунтирован только частично, то выходной импеданс на низких частотах будет больше чем на высоких. Это некоторым образом увеличит угол гашения басовых частот, вызванный разделительным, межкаскадным конденсатором (смотрите 2-ю главу).

Смещение катода при помощи диодов:

Смещение катода при помощи резистора и шунтирующего конденсатора, это наиболее ходовой и традиционный способ задания смещения катоду в каскадах предварительного усилителя. Но есть и альтернативный метод, который стоит рассмотреть перед окончанием этой главы.

Метод подразумевает замену катодного резистора на диод. Это может быть как диод общего применения, светодиод, стабилитрон Зенера, и даже вакуумный диод.

Твердотельные диоды характеризуются падением напряжения, значение которого является константой, пока ток через диод не превышает определенных пределов (обычно это меньше чем 100 микроампер). Это свойство говорит нам о



том, что напряжение на катоде не изменится, независимо от анодного тока, поэтому нет необходимости в шунтирующем конденсаторе. Благодаря этому, наш каскад будет всегда работать на полное усиление, без всяких проблем на нижнем регистре частот, связанных с емкими электролитическими конденсаторами, поскольку диод практически не оказывает сопротивления переменному току. На практике это хорошо применимо для входных каскадов усилителя, где подавление силового и теплового шума наиболее критично. Более того, благодаря отсутствию шунтирующего конденсатора, у нас не будет сдвигов по фазе в анодном токе, что очень важно в случаях, когда каскад находится в петле обратной связи. Это делает метод смещения диодами очень популярным в Хай Фай аппаратуре. Тем ни менее, в случаях, когда каскад должен быть перегружен, нужно добавлять конденсатор примерно в 100nF параллельно диоду, чтобы подавить шум от переключения диода. В случае со стабилитроном, такой конденсатор нужно добавлять в любом случае, в независимости от того находится ли каскад в режиме перегруза или нет.

Конкретное значение напряжения смещения, будет зависеть от типа диода, или от комбинации нескольких диодов, которые могут быть включены последовательно или в параллель, таким образом, добиваясь нужного напряжения. Основные значения таких напряжений указаны в таблице 1.1.

Выпрямительные диоды общего назначения и сигнальные диоды, как правило, имеют падение напряжения в 0.6 вольт. Падения напряжения на светодиодах, зависит от их цвета. У светодиодов есть еще одно привлекательно свойство, это то, что они светятся, и их можно вывести на лицевую панель усилителя, как индикатор питания, например. Если лампа сильно перегружена, то ток лампы будет расти, и ток сетки начнет сильнее течь в катод и через светодиод, что заставит светодиод светиться ярче, так что при использовании его в качестве индикатора, можно отображать уровень перегруза.

Лаповый диод даст нам меньшую производительность, так как его сопротивление по переменному току выше, а переходные характеристики не идеально линейные. Да и такой диод будет производить больше шума в сигнал. Падение напряжение на вакуумном диоде очень сильно зависит от производителя и возраста лампы, но этим напряжением можно управлять при помощи напряжения на нити накала. Так что при некоторых экспериментах – можно добиться желаемых результатов. На рисунке 1.27d показана лампа

Diode Type	Typical Voltage Drop at 5mA Anode Current
Signal / Rectifier Diode	0.6V
Red LED	1.6V
Bright Red LED	2V
Yellow LED	2.1V
Green LED	2.2V
Blue LED	3V
Red (Super Bright) LED	1.8V
Blue (Super Bright) LED	4.5V
EB91 / 6AL5 Valve	2 to 4V

Table 1.1: Typical diode voltage drop.

Разработка ламповых предварительных усилителей для гитары и баса

ЕВ91/6AL5, это двойной диод в 7-ми контактном корпусе, в данный момент снят с производства, но все еще доступен в продаже.