

Глава 5. Катодный повторитель.

Основные параметры катодного повторителя. Графический анализ. Смещение по переменному току катодного повторителя. Связь по постоянному току. Пентод как катодный повторитель. Катодные повторители в гитарных усилителях. Предварительный узел для большего усиления. Итоговые формулы.

В обычном соединении триода мы будем использовать сетку для подачи сигнала, а усиленный сигнал забирать с анода. Однако, так же сигнал можно снять и с катода, в этом случае мы получим вариант включения триода называемый **катодный повторитель**, и как более подробно будет рассказано ниже, обладающего некоторыми уникальными свойствами. Многие книги дают лишь поверхностное изучение катодного повторителя, приписывая ему лишь роль преобразователя сопротивлений. Это конечно, верно для HiFi схем, но применительно к гитарным усилителям роль катодного повторителя более значительная, он также участвует в формировании тона, как и любой другой участок схемы, и особенно полезен в Hi-Gain усилителях. Катодный повторитель получил наиболее широкое распространение как узел, нагруженный на темброблок и буфер посылы в петле эффектов. Эта глава начинается с описания катодного повторителя как в любых других «учебниках», прежде чем перейти к его применению в гитарном усилении.

Основные параметры катодного повторителя:

На рисунке 5.1 показана упрощённая схема катодного повторителя. Смещение можно сделать фиксированным или же сделать от отдельного источника, как будет описано ниже. Первое, что следует отметить, это то, что если сетка больше смещается в положительном направлении, то ток через лампу увеличивается, и этот же ток течёт через катодный резистор. Это приводит также к увеличению напряжения на катоде, и поэтому выходной сигнал снятый с катода должен быть в фазе с входным сигналом, таким образом, катодный повторитель является не инвертируемым каскадом.

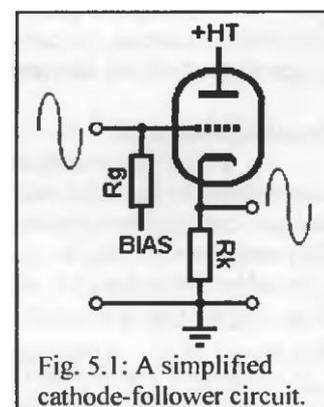


Fig. 5.1: A simplified cathode-follower circuit.

Усиление:

Катодный повторитель является частным случаем усилителя со стопроцентной (через катодный ток) отрицательной обратной связью [подробнее в главе 9]; весь выходной сигнал возвращается обратно на вход. Часть обратной связи, β , равно 1 поэтому усиление каскада будет равно $A_o/(1+A_o)$. Мы помним, что усиление при не шунтированном катодном резисторе определяется по формуле IV:

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

Но в данном случае отсутствует анодный резистор и сигнал снимается с R_k , формула упрощается:

$$A = \frac{\mu \cdot R_k}{r_a + R_k(\mu + 1)} \dots \dots \dots \text{XXVIII}$$

$$A = \frac{\mu}{\mu + 1} \cdot \left(\frac{R_k}{R_k + r_a / (\mu + 1)} \right)$$

Но для большинства ламп μ гораздо больше 1, так что приближённая формула будет:

$$A \approx \frac{\mu}{\mu + 1} \dots \dots \dots \text{XXIX}$$

Из чего ясно следует, что коэффициент усиления по напряжению, у катодного повторителя, всегда несколько меньше, чем 1.

В связи с очень высокой долей обратной связи, гармонические искажения и шум уменьшаются на коэффициент $\mu+1$, а пропускная способность увеличивается на то же значение. В одиночном триодном соединении происходит очень мало гармонических искажений даже без обратной связи, а катодный повторитель становится уже действительно чрезвычайно линейным усилителем, с очень широкой пропускной способностью, что делает его бесценным для HiFi аппаратуры. Более того, он сохраняет эту линейность даже при значительном износе самой лампы.

Само название «катодный повторитель» связано с тем, что выходной сигнал не только находится в фазе с входным, но и почти идентичен ему. На первый взгляд мы могли бы предположить, что пользы от катодного повторителя в гитарных усилителях не много, особенно если принять во внимание то, что его коэффициент усиления не может быть больше единицы. Тем не менее, было бы не правильно утверждать, что катодный повторитель не имеет усиления вообще, даже если это технические потери (чем является коэффициент усиления меньше 1). Вместо этого, катодный повторитель предлагает коэффициент усиления по току и многое другие полезные свойства, о чём ещё будет рассказано.

Входная ёмкость:

Чтобы понять, почему пропускная способность выросла, рассмотрим входную ёмкость. В обычном триодном включении наличие эффекта Миллера приводит к значительному увеличению входной ёмкости путём умножения C_{ga} на усиление каскада. В катодном повторителе, однако, анод соединен непосредственно с питающим напряжением, в то время как C_{ga} эффективно делённое на обратную связь, даст:

$$C_{in} = C_{ga} + C_{gk}(1 - A) \dots\dots\dots XXX$$

Но так как значение $C_{gk}(1-A)$ крайне мало, то для аудио частот формула может быть упрощена:

$$C_{in} \approx C_{ga}$$

Для ECC83 это составит всего 1,6пФ, так что можно ожидать, что частотная характеристика будет без спадов в очень широких пределах.

Входное сопротивление:

На схеме, показанной на рисунке 4,1 входное сопротивление просто равно резистору утечки, который может иметь любое удобное значение, если оно не превышает данные на лампу. В других вариантах схем, которые мы рассмотрим в этой главе, входное сопротивление может иметь очень большое значение, вплоть до бесконечно большого, если катодный повторитель имеет не посредственную, прямую связь с предыдущим этапом.

Выходное сопротивление:

Как отмечалось в главе 1, что при взгляде со стороны анода, в сопротивлении ниже катода появляется множитель $\mu+1$. Тем не менее при взгляде с катода, у сопротивления выше катода появиться делитель $\mu+1$. Из этого легко показать, что выходное сопротивление самого катода, которое называется катодным сопротивлением, составит r_k :

$$r_k = \frac{R_a + r_a}{\mu + 1} \dots\dots\dots XXXI$$

Обычно катодный повторитель не имеет анодного резистора, R_a , так что катодное сопротивление можно по более простой формуле $r_a/(\mu+1)$. Для ECC83 это будет около 640 Ом. Что касается связи

по переменному току, то включённый параллельно катодный резистор даст суммарное сопротивление всей цепи:

$$Z_{out} = \frac{r_a}{\mu + 1} \parallel R_k \dots\dots\dots XXXII$$

$$Z_{out} = r_k \parallel R_k$$

Но, в большинстве конструкций значение R_k гораздо больше r_k , так что может быть проигнорировано в расчётах. Кроме того для всех нормальных триодов μ намного больше единицы. $\mu/r_a = g_m$, тогда $r_a/\mu = 1/g_m$, таким образом расчёт выходного сопротивления может быть упрощён до формулы:

$$Z_o \approx r_k \approx 1/g_m \dots\dots\dots XXXIII$$

Откуда видно, что чем выше крутизна характеристик лампы, тем ниже выходное сопротивление.

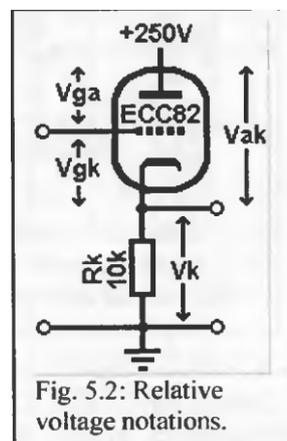
Такое низкое выходное сопротивление говорит о том, что катодный повторитель потребляет значительный ток от источника питания, поэтому он способен работать из большими нагрузками без ущерба сигналу - это одно из наиболее полезных свойств катодного повторителя. Кроме того, низкое выходное сопротивление идеально подходит для соединения разных участков схемы длинными проводами, так как любые, наводимые внешними источниками помехи в кабеле, будут шунтироваться этим низким сопротивлением, поддерживая хорошее отношение «сигнал-шум».

Вот почему катодный повторитель так же часто называют **буфером сопротивления**, так как он предполагает очень высокое входное сопротивление и низкое выходное. Катодный повторитель может использоваться в качестве промежуточной стадии между участком с высоким сопротивлением и низким, или чувствительным в шумам, участком, без добавления каких-либо дальнейших существенных искажений или шумов.

Графический анализ

Прежде чем исследовать виды катодных повторителей используемых в гитарных усилителях, разберём сначала его предназначение как «в учебнике».

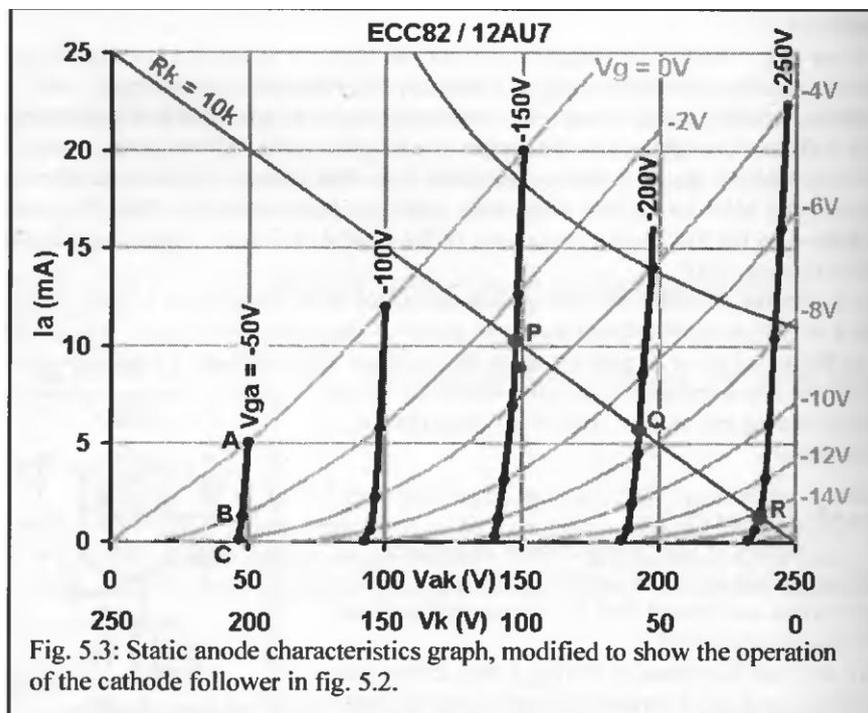
Если больше всего заинтересованы в получении очень низкого выходного сопротивления и хороших характеристик для последующих нагрузок на узел катодного повторителя, то мы, естественно, выберем лампу с высоким током потребления и высоким g_m . На рисунке 5.2 показана простая схема с использованием лампы ECC82/12AU7, которая имеет хорошие данные для использования в предусилителях. В нашем случае питающее напряжение 250В, хотя катодные повторители не сильно восприимчивы к перемене напряжения питания.



Основной нагрузкой является резистор в катод лампы R_k , поэтому, чтоб увидеть его работу рисуем линии нагрузки, как для обычного каскада усиления. Катодный повторитель это в первую очередь усилитель «напряжение – ток», или **усилитель крутизны**, мы используем относительно низкое значение катодного резистора, чтоб получился высокий ток покоя анода. В нашем случае для резистора 10К линии нагрузки изображены на рис.5,3.

Тем не менее, мы не сможем вычислить величины усиления и амплитуды сигнала непосредственно из этого графика, поскольку все значения на нём приведены относительно катода, но в нашем случае напряжение на катоде не является постоянным, а изменяется вместе с напряжением на сетке. Вместо этого мы можем представить новую лампу с теми же характеристиками что и у катодного повторителя и перерисовать кривые для неё. Поскольку

напряжение на аноде фиксировано напряжением питания, то имеет смысл взять его за точку отсчёта для всех измерений, таким образом сеточные кривые будут перерисованы относительно V_{ga} вместо V_{gk} . На практике не стоит рисовать новые кривые при моделировании схемы, они лишь облегчают понимание принципа работы.



Из рисунка 5,2 видно, что $V_{ga} = V_{ak} - V_{gk}$, поэтому $V_{ak} = V_{ga} + V_{gk}$.

Таким образом, если представить что $V_{gk} = 0$, тогда $V_{ak(\text{катодного повторителя})}$ должно быть равно V_{ak} , как на исходном графике.

На пример, если $V_{ak} = 50\text{В}$ и $V_{gk} = 0\text{В}$, тогда:

$$V_{ak(\text{катодного повторителя})} = 50 - 0 = 50\text{В}$$

Фиксируем это на графике на сеточной кривой 0В. Точка А на рисунке 5,3

Если $V_{ak} = 50\text{В}$ и $V_{gk} = -2\text{В}$, тогда:

$$V_{ak(\text{катодного повторителя})} = 50 - 2 = 48\text{В}$$

Отмечаем этот как точка В на сеточной кривой -2В.

Если $V_{ak} = 50\text{В}$ и $V_{gk} = -4\text{В}$, тогда

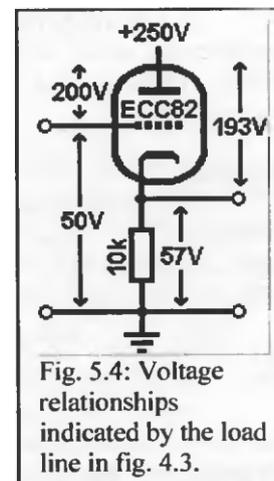
$$V_{ak(\text{катодного повторителя})} = 50 - 4 = 46\text{В}$$

Строим точку С, соединяя эти точки вы получим новую сеточную кривую катодного повторителя для $V_{ak} = 50\text{В}$. Другие кривые строятся подобным образом.

Наиболее очевидным отличием является то, что новые кривые почти вертикальны, указывая на сильное уменьшение эффективного анодного сопротивления лампы, до примерного значения $1/g_m$, или 330 Ом в нашем случае. Во вторых, отличие в том что сеточные кривые почти прямолинейны, что предполагает низкие искажения сигнала, то есть это именно, то что мы и ожидали.

Кроме того, нам важно знать изменение фактического напряжения на катоде, так что на рисунке добавлена вторая шкала на оси абсцисс. Если на лампе полное напряжение питания (между анодом и катодом) то катод получается на уровне 0В. Если лампу «замкнуть», то на катоде будет полное напряжение питания, таким образом напряжение на катоде V_k меняется от нуля вольт до полного напряжения питания, но не наоборот.

С помощью этого нового графика мы можем более чётко увидеть, как работает катодный повторитель. Для простоты выберем точку смещения находящуюся точно на значении $V_{ga}=200V$, отметив её на кривой точкой Q. Это означает что напряжение покоя сетки должно быть на 200В отрицательнее чем напряжение на аноде, которое равно полному напряжению питания или $250-200=50V$. Напряжение смещения V_{gk} , легко считается из сеточных кривых и составит около -7В. С другой стороны, можно узнать напряжение на катоде непосредственно по шкале графика, которая добавлена с низу, от куда видно что оно 57В, так что оба метода показали одинаковый результат. Все рассматриваемые напряжения для наглядности показаны на рисунке 5.4



С положительной полуволной сигнала, напряжение на сетке тоже меняется в положительную сторону, таким образом напряжение сетка-анод будет уменьшаться. Если вы введём 100В входного сигнала, то можно сказать что рабочая точка «качается» вдоль линии нагрузки между точками P и R. Изменение напряжения на катоде тогда будет от 147В до 236В, то есть амплитуда составит 89В. Поэтому усиление будет: $V_{out}/V_{in}=89/100=0,8$, таким образом мы видим что коэффициент усиление немного меньше единицы, что и следовало ожидать. Увеличение сопротивления нагрузки приведёт к увеличению коэффициента усиления, приближая его к $\mu/(\mu+1)$ или около 0,95 для ECC82, хотя на практике обычно эти «пустяковые» цифры не важны.

В рассматриваемом случае со смещением в точке Q видно, что лампа достигнет отсечки перед ограничением сеточного тока, и максимальный не ограниченный сигнал на выходе может составить 115В, или другими словами входная чувствительность каскада составит $115/0,89=129V$. Конечно, максимальная амплитуда сигнала без ограничений будет в случае выбора точки смещения по середине между сеточным ограничением тока и отсечкой лампы. Теоретическая максимальная амплитуда выходного сигнала составит:

$$V_{O(max\ p-p)} = \frac{HT}{1 + r_a / R_k} \dots\dots\dots XXXIV$$

Если катодный повторитель имеет сильную нагрузку сопротивлением R_1 , то R_k в приведённой выше формуле должно быть заменено на $R_k \parallel R_1$, что указывает на то что низкое выходное сопротивление не обязательно означает управление большими амплитудами сигнала с тяжёлой нагрузкой.

При условии не сильной нагрузки на катодный повторитель, его входная чувствительность очень большая, что делает очень трудным его перегрузку. Кроме того, хоть и характеристики отсечки катодного повторителя и у триода в обычном включении в целом аналогичны, но искажения из-за сеточного тока довольно сильно отличаются: так если мы подадим на сетку положительную полу волну, то и катод становится более позитивным, так как он всегда стремится следовать за сеткой, так что бы сетка «подгоняла» катод перед протеканием сеточного тока. К тому же, как только мы достигаем этого порога, сеточный ток стекает вниз через катодный резистор и это способствует усилению положительных колебаний выходного сигнала! В результатах этого является то, что положительные пики выходного сигнала начинают мягко поджиматься (компрессироваться), за долго до ограничения. В гитарном усилителе этот эффект может быть использован чтобы «смягчить» или «насытить» тон звука, но это разберём позже.

Смещение по переменному току катодного повторителя.

Ранее мы анализировали производительность лампы, но до сих пор не закончили построение всей цепочки. Мы знаем из нагрузочных линий изображённых на рисунке 5.3, что в состоянии покоя сеточное напряжение 50В, а напряжение на катоде 57В, поэтому всё что остаётся теперь это настроить смещение по этим условиям.

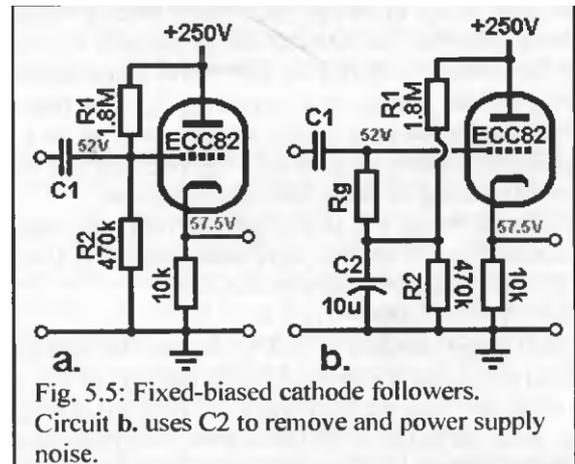
Фиксированное смещение

Простейшим решение получить эти 50В будет сделать простой делитель между напряжением питания и землёй, как показано на рисунке 5.5а. Поскольку желательно поддерживать входное сопротивление высоким, то нужно использовать резисторы большого номинала. Именно поэтому резистор R2 был выбран с номиналом 470К, так как напряжение сетки V_g , должно быть 50В, тогда R1 будет:

$$R1 = \frac{HT - V_g}{V_g / R2} = \frac{250 - 50}{50 / 470k} = 1880k\Omega$$

Примем ближайшее значение из стандартного ряда 1,8М. Рассчитаем фактическое напряжение на сетке: $250 \times [470K / (1800K + 470K)] = 52В$, что достаточно близко.

Есть два очевидных недостатка схемы изображённой на рисунке 5.5а. Во-первых, входное сопротивление равно $R1 \parallel R2$ или 370К в нашем случае, что является достаточно низким, хотя этот недостаток можно было преодолеть, используя большее значение для R1 и R2. Вторая проблема в том, что возникнут дополнительные помехи на сетке лампы от напряжения питания (хотя и ослабленные). Конечно, если напряжение питания хорошо фильтруется или аудио сигнал, подающийся на сетку всегда очень большой, то эти помехи окажутся незначительными. Входной конденсатор C1, конечно же, необходим для развязки по постоянному напряжению и его значение выбирается исходя из входного сопротивления, так как и любого другого межкаскадного конденсатора.



Если помехи от напряжения питания будут создавать проблемы, то схема может быть изменена чтоб получить всё те же 52В и содержать дополнительный фильтр для питания. Схема на рисунке 5.5b демонстрирует это. Напряжение смещение обеспечиваемое делителем напряжения сильно фильтруется конденсатором C2 и это напряжение потом уже подаётся на сетку через резистор утечки сетки Rg. Значение этого резистора можно взять любым, лишь бы оно не превышало допустимое значение по паспорту лампы, таким образом, мы можем контролировать входное напряжение каскада. Минимальное значение для конденсатора C2 (чтоб получить хороший фильтр до 1Гц) вычисляется по формуле:

$$C = \frac{1}{2\pi R}$$

Где

$$R = R1 \parallel R2 \parallel Rg$$

Значения больше или равного 10мкФ будет вполне достаточно.

Резистор сеточного блокиратора не показан для ясности понимая схемы, но всегда рекомендуется его использовать. В этом случае напряжение на сетке также будет 52В, но есть небольшой риск резкого повышения напряжения в момент включения питания и если по схеме возможно повышение сеточного напряжения свыше 100В, то следует добавить диод и резистор для защиты. [см. главу2, Связь по постоянному току]

Смещение катода

Описанные выше методы фиксированного смещения используются не часто, так как метод смещения катода обычно требует меньшего количества компонентов и имеет преимущество в том, что смещение будет самонастраиваться по мере старения лампы. Катодное смещение также предлагает более высокое входное сопротивление и исключает возможность пробоя между сеткой и катодом на первых моментах включения питания схемы, так как напряжение на сетке возрастает вместе с напряжением на катоде, по мере прогрева катода.

Смещение катода катодного повторителя легко организовать, сделав просто «отвод» необходимого напряжения на сетку от катодного резистора, как показано на рисунке 5.6, тем самым подав на сетку потенциал ниже того который будет на катоде. Потенциометр на рисунке показан для наглядности, в действительности для организации смещения используют постоянные резисторы, как это показано на рисунке 5.7. Номинал резистора Rb, может быть рассчитан точно также как для триода в нормальном включении, либо из графиков нагрузки катода или просто путём расчёта от точки смещения.

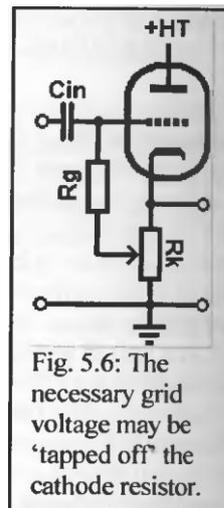


Fig. 5.6: The necessary grid voltage may be 'tapped off' the cathode resistor.

Исходя из показанного на рисунке 5.3 можно обнаружить, что, при смещении около 7В ток покоя анода составит примерно 6мА. Поэтому номинал резистора будет:

$$R = V/I = 7/0.006 = 1,17K$$

Принимаем ближайшее стандартное значение 1К. Конечно, общее суммарное сопротивление в катоде увеличится за счёт добавления этого резистора, что конечно же несколько изменит линию нагрузки катода, для устранения этого можно было бы выбрать Rk равным 9К, для того что общее сопротивление составило 10К как и было ранее, но на практике разница будет незначительна.

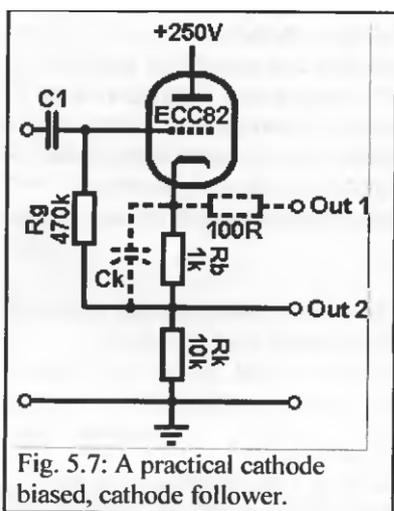


Fig. 5.7: A practical cathode biased, cathode follower.

На рисунке 5,7 видно, что выходной сигнал может быть взят непосредственно с катода (Out1) или от точки соединения Rb и Rk (Out2). Использование выхода непосредственно с катода является традиционным, но он имеет отклонения от исходного тона вследствие высокого уровня отрицательной обратной связи присутствующей в катодном повторителе. Это провоцирует фон и даже гул при перегрузке. Неблагоприятное сочетание паразитной ёмкости и индуктивности (это принцип электронно-последовательного осциллятора). Если используется этого выход, то автор книги настоятельно рекомендует использовать последовательно включённый резистор 100 Ом или резистор большего номинала, как это показано на рисунке, что изолирует катод от бродячих сопротивлений*

* Можно предположить, что катодный повторитель будет застрахован от бродячих сопротивлений, так как его коэффициент усиления меньше единицы. Тем не менее, правильное (или скорее не удачное) сочетание индуктивности и ёмкости на сетке лампы или же в её катодных цепях вполне возможно спровоцирует электронно-следящие колебания. Следовательно, резистор сеточного блокиратора будет не лишним от защиты он ВЧ нестабильности.

Недостаток выхода №2 (Out2) это небольшое ослабление сигнала в виду образовавшегося резисторами Rb и Rk делителя, хотя Rk обычно намного меньше чем Rb, так что степень ослабление будет маленькой. Тем не менее, выход №2 имеет то преимущество, что Rb делает ту же работу что и резистор блокиратор – изолирует катод от бродячих сопротивлений. Таким образом, использование этого выхода предпочтительнее, так как нет необходимости в использовании дополнительных элементов.

Можно предположить, что входное сопротивление этого участка будет равно резистору утечки Rg, но на самом деле оно будет гораздо больше. Причиной этого является то, что переменный сигнал на катоде имеет одинаковую фазу с входным сигналом, лишь с немного меньшей, чем у него амплитудой. Очевидно, что такой же сигнал будет и в точке соединения Rb и Rk, хотя он будет незначительно ослаблен делителем образованным Rb и Rk. Это означает что в нижней части Rg будет такой же по фазе лишь незначительно ослабленный сигнал что и на сетке лампы в верхней части Rg. Таким образом различие напряжений на разных концах резистора Rg всегда будет очень мало, гораздо меньше чем если б один из его выводов был подключен к земле. В результате этого, незначительный токовый сигнал теряется на этом резисторе, тем самым ощутимо увеличивая эффективное входное сопротивление на этом участке схемы. Этот эффект называется **самонастройкой**, сопротивление резистора по переменному току оказывается гораздо большим чем его физическое сопротивление, схема улучшает свои характеристики «подтягиваясь». Входное сопротивление в этом случае составит:

$$Z_{in} = \frac{R_g}{1 - \frac{A \cdot R_k}{R_k + R_b}} \dots\dots\dots XXXV$$

Вытекающий из этого плюс это то, что можно использовать резистор утечки сетки с меньшим номиналом, без существенного изменения нагрузки для предыдущего участка схемы, тем самым уменьшая шум от применения резисторов с большими сопротивлениями. Значение резистора у схемы на рисунке 5.7 составляет 470к, и принимая во внимание коэффициент усиления 0,89, что обозначено на рисунке 5.3, входное сопротивление будет:

$$Z_{in} = \frac{R_g}{1 - \frac{A \cdot R_k}{R_k + R_b}} = \frac{470k}{1 - \frac{0.89 \times 10k}{1k + 10k}} = 2.5M\Omega.$$

Это значение очень большое, что позволяет применять входной конденсатор C1 не большого номинала для полного пропускания всех слышимых частот. Тем не менее, этот метод смещения имеет один недостаток, поскольку предполагается что полное напряжение сигнала, появляющееся в точке соединения Rb и Rk достигает сетки. На самом деле сопротивления на выходе предыдущего каскада образует потенциальный делитель с Rg, так что только часть сигнала с катода достигает сетки, уменьшаясь на коэффициент обратной связи и следовательно «идеальное» значение входного сопротивление не достигается. К счастью для гитарных усилителей это не так важно, за исключением, что конденсатор C1 лучше взять несколько больше расчётного, чтобы избежать потери низких частот. Обычно это удобное составляет 10нФ. Если же необходимо точнее настроить долю низких частот, то лучше уменьшить номинал выходного конденсатора.

В старомодных конструкция не будет удивительным обнаружить шунтирующий конденсатор Ск (показанный пунктиром на рисунке), соединённый параллельно с резистором Rb. Причиной этого является то, что при обходе резистора Rb он больше не ослабляет сигнал и входное сопротивление увеличивается на:

$$Z_{in} = \frac{R_g}{1 - A} \dots\dots\dots XXXVI$$

Или около 4,3M в этом случае. Тем не менее, конденсатор должен иметь большое значение, что подразумевает применение электролитического конденсатора, которые всегда не желательны в звуковых цепях, так что этот элемент обычно не встречается в современных схемах. Если необходимо увеличить входное сопротивление ещё больше (что мало вероятно), то лучше увеличить номинал R_g . В HiFi схемах можно заменить R_b на светодиод (или цепочку из нескольких светодиодов соединённых последовательно для получения нужного напряжения смещения) и этим получить высокое входное сопротивление не добавляя такой конденсатор в схему. Пример этого показан на рисунке 5.8. В данном примере используется лампа ECC83, так что

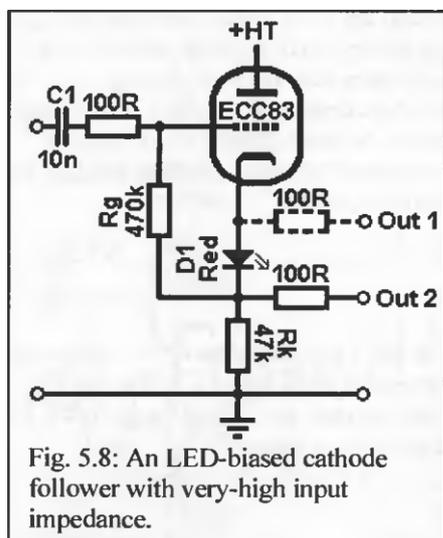


Fig. 5.8: An LED-biased cathode follower with very-high input impedance.

напряжение смещение требуется не большим, что легко достигается красным светодиодом (-1,6В). Светодиод можно даже установить на передней панели усилителя в качестве индикатора включения питания. Поскольку светодиод эффективно замыкает схему по переменному току, то резистор блокиратор необходим на каждом из двух возможных выходов, а также не лишним будет добавить резистор сеточного блокиратора для завершения всей цепочки. Усиление этого повторителя приблизительно составляет 0,92 и входное сопротивление 6M. Эта схема особенно полезна в качестве входного буфера для пьезо датчиков используемых в электроакустических гитарах, которые могут дать очень много яркого «металлического» звука если они не подключаются во входу с очень высоким входным сопротивлением.

Связь по постоянному току в катодных повторителях.

Катодный повторитель является очевидным кандидатом для применения связи по постоянному току, так как его сетка просто обязана иметь высокое напряжение относительно земли. При разработке схем применяются те же принципы что и были описаны в главе 2 этой книги, так что нет смысла повторяться. Отметим что некоторое варьирование типами ламп и значениями элементов обвязки всё же потребуется для достижения оптимального результата. Например, лампа ECC82 с резистором 10K в катод, показанная выше, требует наличие на сетке 50В напряжения. Очевидно, что анод из предыдущего каскада вряд ли имеет такое низкое напряжение покоя, даже если там стоит пентод, но всё же выход есть. На рисунке 5.9 показан теоретический пример, в котором предполагается напряжение покоя анода у предыдущего каскада 100В. Его уровень снижается до 50В, но так же может быть добавлен шунтирующий конденсатор для повышения уровня высоких частот (показан пунктиром), его значение может быть найдено по формуле XIV. В нашем случае значение 4,7нФ даст подъём на средней частоте около 200Гц. Очень похожую схему можно увидеть в усилителях Sound City серии LB.

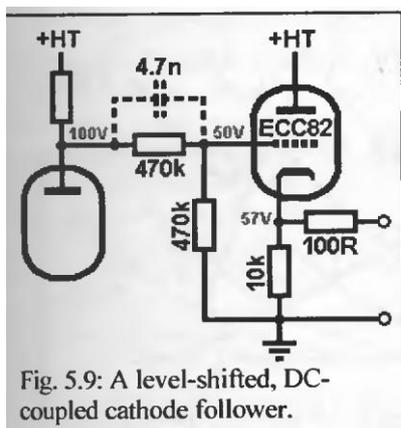


Fig. 5.9: A level-shifted, DC-coupled cathode follower.

Конечно же, прямая связь к сетке от анода предыдущего каскада является желательной с точки зрения простоты и в гитарных усилителях это является очень распространённым решением, и также может дать некоторые неожиданные результаты. Для создания прямой связи «как в учебнике» мы должны так спроектировать катодный повторитель, чтоб необходимое напряжение на сетке соответствовало напряжению покоя анода на предыдущем каскаде. Это потребует использования лампы с малым g_A или применив большое значение R_k на обеих лампах. Задача облегчается, если на предыдущем каскаде будет небольшое напряжение покоя анода, что предполагает использование триода с низким g_A или пентода.

К примеру, на рисунке 5.10 показана схема в которой предыдущая лампа это пентод, напряжение покоя анода которого будет $\frac{1}{2}$ напряжения питания или 150В. Для демонстрации преимуществ использования триодов с низким r_A статические анодные характеристики ECC83 и ECC82 показаны на рисунке 5.11. Была добавлена шкала напряжений на катоде и подрисована «новая сеточная кривая», которая сделала на известному напряжению на сетке 150В. Сразу ясно, что лампа ECC83 потребует большого значения резистора Rk для необходимости такого смещения. Даже приняв 100K нагрузки, это будет всё ещё тёплое смещение $V_{gk}=0,75V$ (точка отмечена на линии нагрузки) и последствия этого будут описаны позже. Лампа ECC82, с другой стороны, имеет гораздо меньшее значение r_A и величина смещения сетки при использовании катодного резистора 100K будет примерно по центру, увеличивая размах выходного сигнала, но повторитель будет также хорошо работать и с использованием резистора 22K в катоде, если необходима максимальная амплитуда сигнала. Очевидно, что ECC82 является очевидным выбором. Конечная схема катодного повторителя показана на рисунке 5.12 и там используется компромиссное значение 47K для резистора Rk, что позволяет получить разумные значение входного и выходного сигнала. Сеточный блокиратор и резистор на выходе были добавлены, чтоб гарантировать стабильность ВЧ, а диод был добавлен для защиты от пробоя в момент включения питания.

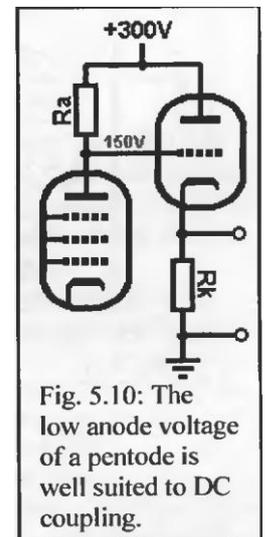


Fig. 5.10: The low anode voltage of a pentode is well suited to DC coupling.

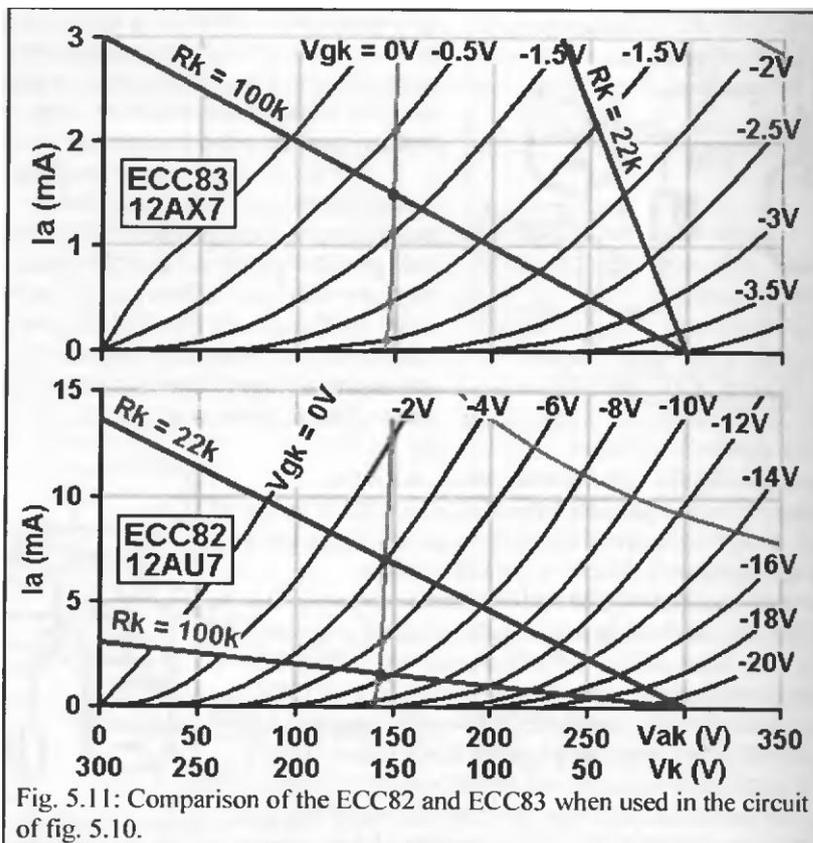


Fig. 5.11: Comparison of the ECC82 and ECC83 when used in the circuit of fig. 5.10.

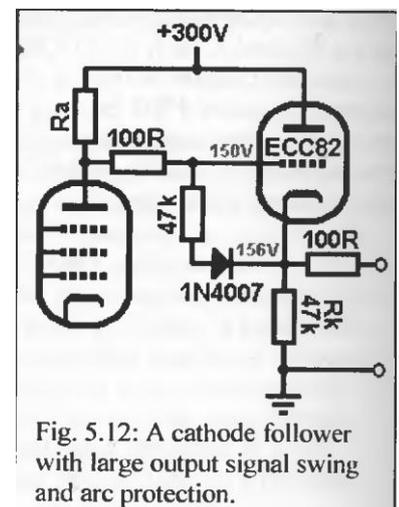


Fig. 5.12: A cathode follower with large output signal swing and arc protection.

Сочетание пентода и катодного повторителя является очень распространённым явлением в аудио конструкциях. Пентод даёт высокие коэффициент усиления, но имеет высокое выходное сопротивление, в то время как катодный повторитель предлагает почти бесконечно больше входное сопротивление и может служить отличным буфером между пентодом и последующими участками схемы. Есть также несколько типов ламп содержащих один слабо сигнальный пентод и один триод в одном корпусе, на пример: ECF82/6BL8 (которые ещё производятся), ECF82/6U8, ECF802, 7199, 6EA8, 6AW8, 6LN8 и это лишь некоторые из них. Не редкость увидеть такие лампы. На рисунке 5.13 показан практический пример использования лампы ECF80 (резистор утечки сетки входной лампы и компоненты обвязки условно не показаны) в гитарном усилителе катодный повторителя скорее всего будет использоваться для нагрузки на темброблок.

Как было сказано в главе 2, если напряжение на катоде высокое, то необходимо поднять накал во избежание превышения паспортного значения напряжения между нитью накала и катодом (см. главу 12). Для лампы ECF80 $V_{hk(MAX)}$ составляет 100В, поэтому для схемы изображённой на рисунке 5.13 накал следует поднять примерно на 30В- 50В, что будет удобно для обоих катодов и триода и пентода.

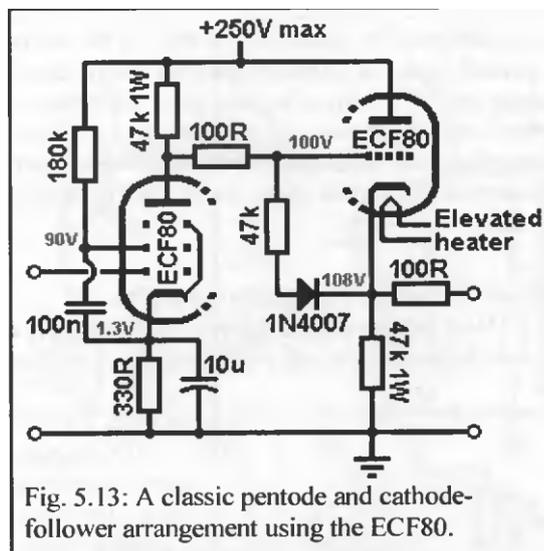


Fig. 5.13: A classic pentode and cathode-follower arrangement using the ECF80.

Пентод как катодный повторитель.

Если не обходимо, то пентод также может быть включен в режиме катодного повторителя. Главным преимуществом пентода является то, что в режиме катодного повторителя он способен передавать амплитуду сигнала размером от анодного питания до земли. Высокое значение μ у пентода должно привести схему в более линейный режим, хотя этот плюс по сравнению с триодом носит лишь академический характер.

Принцип проектирования тут такой же как и с применением триода, но следует помнить что экранный ток также протекает и в катодном резисторе и то что экранное напряжение внутри лампы измеряется относительно катода. Поскольку земля и напряжение питания находятся далеко друг от друга и если обходной конденсатор экранной сетки соединён с землёй, то и напряжение экранной сетки было бы фиксировано относительно земли и со стороны переменного тока это было бы равно тому, что оно связано также и с анодом. Таким образом, пентод можно было рассматривать как триодном включении. Одно из преимуществ этого это долговечность, однако, стабилизированное напряжение на экранной сетке оградило бы катод от помех питания анода, хотя следует отметить что улучшение было бы не столь существенным, так как сигнал, появляющийся катодом будет равен анодному делённому $\mu+1$ в любом случае.

Чтоб получить чистое пентодное включение напряжение экран-катод должно быть неизменным, поэтому конденсатор, шунтирующий экранную сетку должен быть подключен непосредственно к катоду. Нагрузочный резистор экранной сетки должен быть включён в схему обязательно, так как в противном случае выходной сигнал на катодом будет шунтирован на напряжение питания через шунтирующий конденсатор.

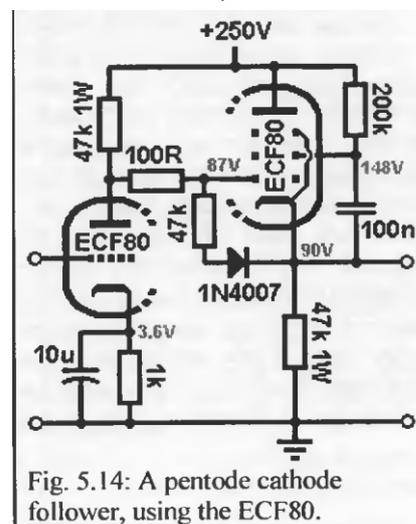


Fig. 5.14: A pentode cathode follower, using the ECF80.

Чистое пентодное включение очень редко применяется в катодных повторителях аудио схем, так как применение триода гораздо проще при почти той же производительности. Пентодные катодные повторители были более типичны для ранних ламп компьютеров, где важно значение оптимальной линейности вплоть до постоянного тока, что врятли понадобится в гитарных усилителях! На рисунке 5.14 показан пример схемы с использованием лампы ECF80, в котором пентодная часть включена как катодный повторитель.

Катодные повторители в гитарных усилителях.

Теперь, когда мы имеем правильное понимание функционирования и проектирования катодных повторителей стоит рассмотреть роль катодного повторителя в гитарных усилителях.

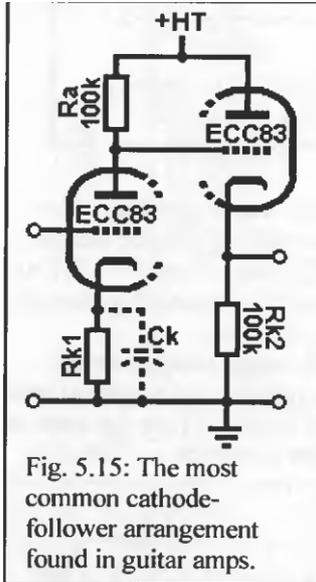


Fig. 5.15: The most common cathode-follower arrangement found in guitar amps.

В некоторых случаях катодный повторитель используется как буфер Send в петле эффектов, его единственным предназначением в этом случае будет обеспечение низкого выходного сопротивления, способного удовлетворить (относительно) низким входным сопротивлениям полупроводниковых педалей эффектов, микшеров, РА оборудования и так далее, и конечно же для борьбы с шумом и помехами от применения проводов. В таких случаях в катодных повторителях применяется не самый дорогой разделяющий конденсатор, так как не ожидается изменения какого либо тонального окраса в звуке.

Но тем не менее, любой кто хоть как то знаком со схемотехникой гитарных усилителей знает, что наиболее распространён катодный повторитель в качестве драйвера для темброблока и многие (можно даже сказать большинство) конструкции используют именно такое же соединение которое показано на рисунке 5.15. Схема во всех конструкциях состоит их лампы ECC83/12AX7 в триодном включении и

такой же ECC83/12AX7 в катодном повторителе, что непосредственно реализовано монтажом в корпусе одной лампы, каждое сопротивление нагрузки 100K. Напряжение питание у разных конструкций может варьироваться, но в целом всё остальное всегда тоже самое. Как может показаться, вся эта цепочка призванная стать буфером для тяжёлой нагрузки в виде темброблока, не предполагает изменение в тональном окрасе звука и возможно так и думали, поэтому схема впервые появилась в самых ранних гитарных усилителях, в частности Fender Bassman 5F6 1959-го года и его последователей. Однако это казалось бы случайная особенность очень важна для тона усилителей в которых применяется этот узел равно как и другие участки их схемы, и частично именно этот узел ответственен за тот огромный успех усилителей которые за основу взяли Fender Bassman и ранние Marshall и Vox в которых используется тот же узел схемы и можно сказать что все современные усилители произошли от них.

Но почему, очевидно «спокойная» схема так важна для тона звука? Чтобы понять это, стоит рассмотреть схему с известными напряжениями. Схема изображённая на рисунке 5.16а взята непосредственно из Fender Bassman 5F6 с изменением напряжения применительно к лампе Mullard ECC83 (В оригинальном усилителе использовалась 7020/ECC803, которая является просто поде высококачественной версией ECC83/12AX7). Анализируя показания напряжений мы получаем очень интересный факт: ток покоя, рассчитанный по анодному резистору Ra для усилительной части схемы составит:

$$\frac{325 - 180}{100k} = 1.45mA$$

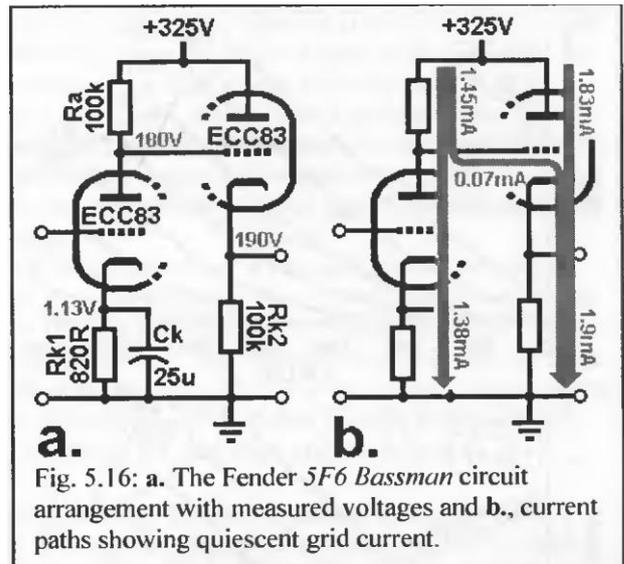


Fig. 5.16: a. The Fender 5F6 Bassman circuit arrangement with measured voltages and b., current paths showing quiescent grid current.

Но ток, рассчитанный по показаниям на катодном резисторе Rk1 будет:

$$\frac{1.13}{0.82k} = 1.38mA$$

Мы ожидали что ток текущие через резистор Ra будет идентичен току, текущему через Rk1, но обнаружили разницу в отсутствующих 0,07мА!

Кроме того, видно что смещение на катодном повторителе составит 180-190=-10В, что является очень большим значением для ECC83 (в предыдущих главах мы имели дело со смещением в диапазоне не ниже -4В для этой лампы) поэтому мы бы ожидали работу катодного повторителя в режиме сильного ограничения сигнала (отсечки), но так как напряжение, сформированное катодным резистором на катоде составило 190В, то это явно другой случай. Единственное место для «пропавшего из расчётов тока» это тек с сетки катодного повторителя вниз к Rk2, увеличивая напряжение на нём на $0,07 \times 100k = 7В$, как это показано на рисунке 5,16b.

Аналогичный вывод можно сделать анализируя линии нагрузки для обоих триодов, показанных на рисунке 5.17: верхний график показывает линии нагрузки анода и катода для каскада усиления. Ожидаемое напряжение покоя анода близко к 180В (на самом деле немного выше) и следовательно это же напряжение будет на сетке катодного повторителя. Если мы изначально предполагаем, что напряжение на сетке катодного повторителя и катоде идентичны, то можем построить нижний график, который имеет обратную шкалу чтоб показать напряжение на катоде и тем самым получаем приблизительную точку смещение катодного повторителя. Получим смещение около -0,55В, что показано пунктирной линией.

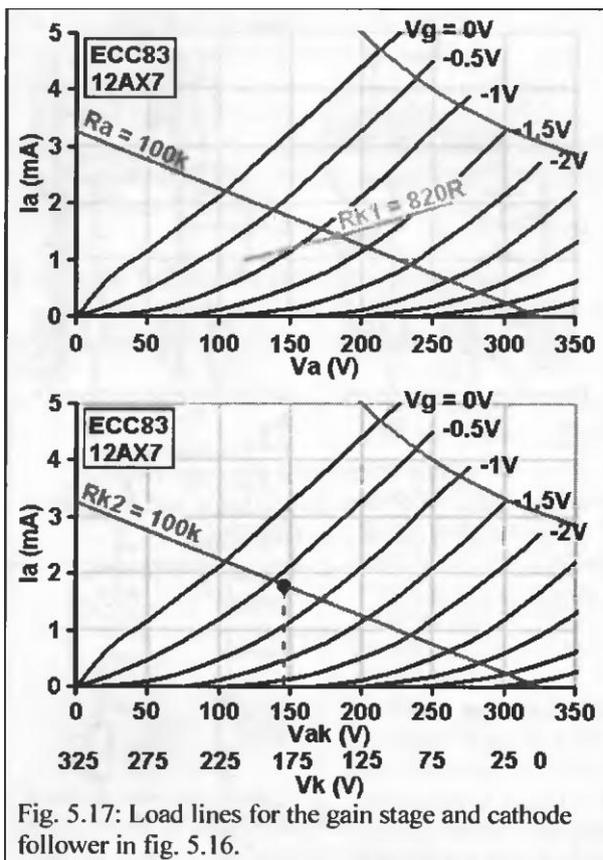


Fig. 5.17: Load lines for the gain stage and cathode follower in fig. 5.16.

Однако, это не сходится с измеренными данными напряжения на катоде 190В и смещением -10В. Объясняя это не соответствие, напомним из главы 1, что сеточный ток начинает течь в лампе, когда смещение её отрицательное, хотя бы около -0,9В что видно из рисунка 5.17, и смещение сетки в этой области было бы хорошим решением, а учитывая что катодное напряжение обязательно должно быть немного выше чем сеточное, то это толкает точку смещения далее вверх по линии нагрузки. В нормальном усилительном каскаде уровень сеточного тока в этой области очень мал, чтоб вызвать отклонения в смещении, но в нашем случае даже не большое изменение в токе вызывает большое изменение напряжения на катодном резисторе, ввиду его большого номинала. Ток, протекающей через сетку вниз к Rk2, повышает напряжение на катоде и одновременно снижает анодное напряжение на предыдущем усилительном каскаде (на величине смещение которого эти процессы тоже отражаются), таким образом «воруя» у него анодный ток. Начинаясь рост напряжения на катоде и падение напряжения на сетке текут на встречу току сетки, и точка их равновесия будет

достигнута, если ток сетки произведёт достаточный уклон предотвращающий дальнейшее увеличение сеточного тока. Другими словами лампе придётся постоянно сглаживать сеточный ток текущий в катодный повторитель и предыдущее вычисления показали что будет 0,07мА.

Мы выяснили, что катодный повторитель постоянно «ворует» ток от предыдущего каскада, как же это сказывается на характеристиках? Если нисходящий сигнал появляется на аноде усилительной части связки, то сеточное напряжение повторителя стремится в низ, назад в область «нормальной работы», а сеточный ток более или менее прекращает течь непосредственно во время этого цикла. Но если входящий сигнал положительный, то и он выталкивает сетку в более положительную область, что вызывает ещё больший ток сетки, протекающий в катодном повторителе, так как он пытается сохранить свой уклон, который в свою очередь «потянет вниз» анодное напряжение каскада усиления, которое в свою очередь стремится вверх! Более того, поскольку сеточный ток стекает в катодный резистор, то он способствует повышению выходного сигнала, таким образом, переход сеточного тока в ограничение смягчается. Другими словами положительные полуволны сигнала сильно сжаты, а отрицательные (нижние) нет, что генерирует много гармонических искажений второго порядка [см. рис 5.19]. Другими словами, катодный повторитель всё ещё даёт чрезвычайно линейное усиление, он усиливает точно всё то, что появляется на его сетке, а его сеточный ток, протекающий из анодного резистора предыдущего каскада вызывает сжатие сигнала.

Эта «мягкая» компрессия сигнала не столь часто встречается у триодов в обычном включении, так как уровень сигнала для этого должен достичь определённого порогового значения до протекания сеточного тока, в то время как в случае такой связки (усиливающий каскад - катодный повторитель) это происходит уже в состоянии покоя, так что под влияние попадает как самый маленький уровень сигнала, так и сигнал с искажением. Катодный повторитель врятли будет доведён до отсечки, так как анод предыдущего триода ECC83 редко даст амплитуду сигнала намного ниже 1/3 напряжения питания, таким образом ограничение на каждой полуволне сигнала будет обычным делом, и будет связано с ограничением тока сетки на стадии усиления и катодным повторителем.

Эта естественная компрессия является одним из наиболее важных элементов в гладком и богатом тоне перегруза и даже была определена как «часть звука электрогитары» на Audio Engineering Society, хотя они не смогли разглядеть ток покоя сетки в катодном повторителе как контролирующий фактор. В самом деле, очень не многие обладатели гитарных усилителей знают от этой важной составляющей и о том, что её существование обязано «не правильному» дизайну: поскольку ECC83 имеет высокое значение r_A и сложно добиться правильного смещения лампы если напряжение сетки высоко, что вам скажет любой учебник. Если бы напряжения питания в Fender Bassman были бы значительно ниже, или если бы номинал катодного резистор был бы «правильно» подобран, то возможно мы не когда не получили бы такого эффекта, и усилитель не стал бы той иконой звука которой он является сегодня. Аналогичным образом, если использовать лампу с более низким значением r_A , в той же схеме, но требуемое значение тока сетки в состоянии покоя уже не будет и снова мы не получим эффекта компрессии (хотя его можно будет попытаться добиться с любой лампой если выбрать нужное значение резистора). В HiFi усилителях мы бы отчаянно избегали этого сеточного тока за счёт снижения напряжения на сетке, уменьшая напряжение питания, увеличивая резистор в аноде предыдущего каскада или делая его смещение более «горячим». В качестве альтернативы мы могли бы увеличить нагрузочный резистор нагрузки катода, который сделает линии нагрузке круче и доведёт точку смещения сетки в текущую область. Для гитарных целей, с другой стороны, желательно использовать это преимущество в компрессии и даже увеличить её. Это можно сделать путём увеличения напряжения сетки или иным способом. Тем не менее, следует помнить, если через сетку течёт ток, то он будет рассеивать на ней какую-то мощность, а для этого сетка уже не предназначена. Максимальная мощность, которая может быть рассеяна сеткой в обычном триоде предусилителя редко предоставляется в паспортных данных, но теоретически врятли превысит 0,2Вт, поэтому слишком сильное увеличение напряжения сетке может привести к перегреву и расплавлению и это может быть сопутствующим фактором пробоя лампы по постоянному току (см. главу2 связь по постоянному току). Использование высокого напряжения на сетке также подразумевает высокое напряжение и на катоде, что создаёт большой перепад значений напряжений между катодом и нитью накала и возможна вероятность пробоя изоляции. К примеру, в усилителе Mesa Boogie

Dual Rectifier катодный повторитель имеет напряжение свыше 200В на катоде, что значительно превышает максимальные 180В, и это значительно повышает уровень шума в результате утечки между катодом и нитью накала.

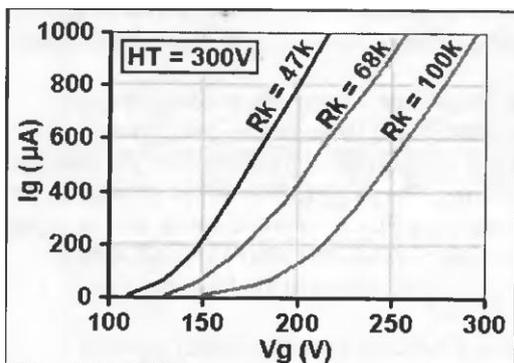


Fig. 5.18: Grid-current measured in a Mullard ECC83 cathode follower with different values of cathode load with a 300V HT.

Безопасным методом увеличения тока сетки будет снижение значение катодного резистора R_{k2} , что также даст дополнительное преимущество, снижая выходное сопротивление повторителя.

Для иллюстрации этого на рисунке 5.18 показаны графики тока покоя сетки измерения по постоянному току, с разными резисторами к катоду, катодный повторитель собран на лампе ECC83, анодное питание 300В. Из рисунка видно, что для данного номинального напряжения ток покоя сетки может быть увеличен путём уменьшения R_{k2} , так как уже больший ток потребуется для установления равновесия. Результат этого увеличения тока показан на рисунке 5.19, где

приведены осциллограммы входного и выходного сигнала катодного повторителя на частоте 1кГц, амплитудой около 55В входного сигнала, синусоида входного сигнала была перевернута и отмасштабирована для лучшего сравнения. Верхний рисунок сделан для резистора 100К в катоду, на нём чётко видно сжатие (компрессия) положительной полуволны сигнала.

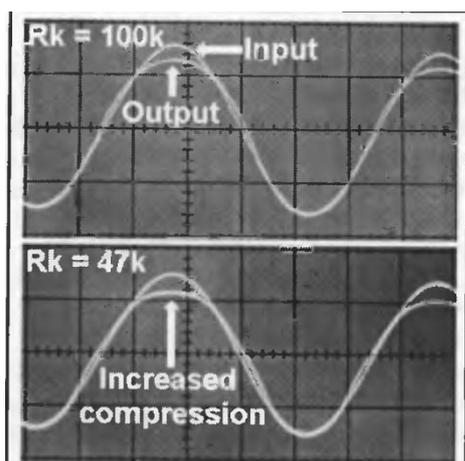


Fig. 5.19: Oscillograms showing the increase in compression caused by reducing the cathode load resistor.

видно как за счёт уменьшения резистора до 47К увеличивается степень компрессии. Хотя она и визуально не большая, но на самом деле имеет значительный эффект «сглаживания» любого «хрустящего» искажения звука, которое может быть получено в предусилителе стоящем перед этим участком схемы. Снижение катодного резистора, в существующем усилителе с катодным повторителем, примерно до 47К-82К будет очень полезным для поддержания сусейна звука и общего «хруста» в перегрузе и этот ход настоятельно рекомендуется. Но всегда следует помнить, что возможно следует «поднять накал» во избежание превышения паспортного значения напряжения между нитью накала и катодом, а также применить резистор блокиратор 100 Ом для защиты (см. рис. 5.12) и продлить этим жизнь лампы, особенно если напряжение питания больше 300В (меры

защиты от пробоя не имеют негативного влияния на тон звука).

Эта особенность соединения каскада усиления на лампе ECC83 и катодного повторителя, является очень важной для Hi Gain усилителей, и иногда встречается в них не однократно. Например в усилителе Soldano SLO100 использует два таких каскада (один из них в буфере посылы петли эффектов), в то время как усилитель Marshall 30TH anniversary (юбилейный выпуск) использует только один такой узел в канале "Crunch" и три каскада на канале "Lead"! Интересно также отметить, что многие усилители Vox, в том числе и AC30, используют этот узел с резистором в катоду повторителя 56К и напряжением на сетке 180В, в результате создавая сильную компрессию. И это ещё один хороший пример того, как большое усиление само по себе не является необходимостью для получения Hi Gain звучания. Даже скромный катодный повторитель с коэффициентом усиления меньше единицы, может внести большой вклад в тон перегруза усилителя.

Предварительный узел для большего усиления.

Как было рассказано выше, связанный по постоянному току катодный повторитель может помочь в создании хорошего тона перегруза, но из этой связки можно извлечь ещё и большую производительность. Воспользовавшись его очень низким выходным сопротивлением, мы можем увеличить усиление на предыдущем каскаде! Это можно сделать путём соединения выхода катодного повторителя и отвода от точки анодного резистора на предыдущем каскаде через разделяющий конденсатор. Такой вид начальной нагрузки является обычным делом для транзисторных усилителей, но удивительно не достаточно изучен в ламповых конструкциях, несмотря на его очевидные преимущества.

На рисунке 5.20а условно показан сигнал переменного тока в каждой точке каскада. Видно, что сигнал будет наибольшим между анодом лампы V1 и нулём источника питания. Сигнал, находящийся на «половине длины»

анодного резистора должен быть равным половине амплитуды сигнала на аноде. Схема, изображённая на рисунке 5.20b показывает такую подгрузку для создания большого усиления всего узла. Резистор в аноде лампы V1 теперь разбивается на два, это R1 и R2, и выход катодного повторителя связан с этой точкой через конденсатор C1.

Предполагая что C1 достаточно велик, а катодный повторитель идеален и имеет усиление равное единице, то сигнал на аноде V1 подающийся на катодный повторитель сразу же передаётся обратно в точку соединения R1 и R2. Поэтому один и тот же сигнал будет образовываться на обоих концах резистора R2. И становится очевидно, что нет никакой разницы по

переменному напряжению между выводами этого резистора, то есть не может быть никаких изменений в переменном токе протекающем через него, что предполагает бесконечное сопротивление! Теперь мы видим, что R2 изменил свой статус в формировании линии нагрузки лампы и получается так, что лампа V1 работает с бесконечно большой нагрузкой в аноде, то есть её усиление становится равным μ .

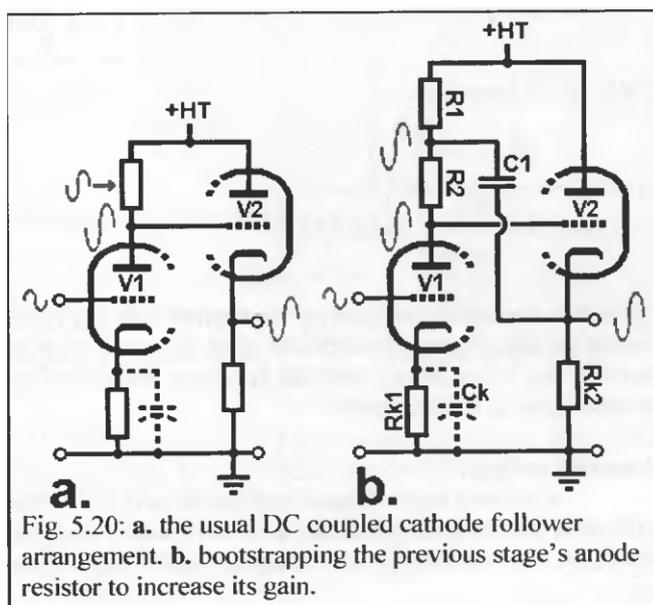
Однако R1 не имеет такой подгрузки. Если анодный резистор был разбит на равные части, то R1 видит в два раза большую разницу по переменному току чем должна быть на нём и следовательно в два раза большую разницу по сравнению со схемой на рисунке "а". Этот ток должен уйти на катодный повторитель и именно поэтому нам требуется его низкое выходное сопротивление.

На самом деле катодные повторители не идеальны, поэтому мы не получим усиление равное μ на первом триоде связки. Для переменного тока величина R1 эффективно увеличивается при такой подгрузке до величины:

$$r = \frac{R1}{1 - A}$$

Где:

A = усилению катодного повторителя.



Таким образом, общая анодная нагрузка V1 будет $r_a + R1$. Если катодный резистор $Rk1$ полностью шунтирован конденсатором, то мы можем получить усиление на V1 равное:

$$A = \frac{\mu \left(R1 + \frac{R2}{1-A} \right)}{r_a + R1 + \frac{R2}{1-A}}$$

Если $Rk1$ не шунтирован, то:

$$A = \frac{\mu \left(R1 + \frac{R2}{1-A} \right)}{r_a + R1 + \frac{R2}{1-A} + Rk(\mu + 1)}$$

Конечно же, такой же принцип может быть применён к любому типу катодного повторителя, хотя именно связь по постоянному току (самый простой случай) даёт лучший результат. Для V1 можно использовать любую лампу, даже пентод. Однако, подобная подгрузка пентода может привести к огромному усилению, что может оказаться не нужным!

Практические конструкции.

Предположив, что большая часть схемы была разработана обычными участками, добавим попросту подгрузку катодного повторителя, это легко сделать в уже существующей схеме. На рисунке 5.21 показана популярная компоновка с использованием триода ECC83, попробуем добавить подгрузку.

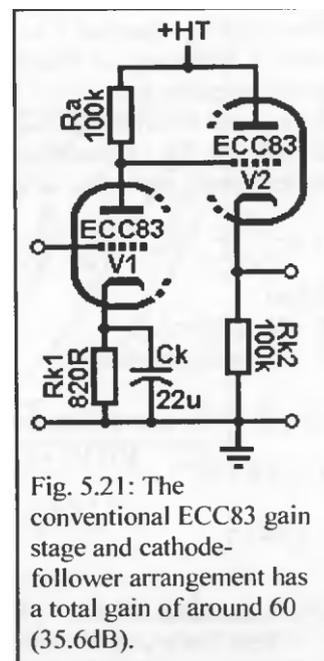
Если анодную нагрузку на лампу V1 разбить на две части R1 и R2, то отношение этих двух резисторов не является критичным. Конечно же существует оптимальное соотношение приводящие к максимальному усилению, но вычисления этих значений будут не оправданно сложными и долгими. Вместо этого проще просто сделать R1 и R2 одинаковыми, что даст почти тоже максимальное усиление, что и оптимальные значения. Реализуя этот ход нужно помнить что, добавление этой подгрузки создаст дополнительную нагрузку на катодный повторитель, таким образом, общая нагрузка на катод составит:

$$Rk2 \parallel R1 \parallel (R2 + r_a)$$

(Предполагается, что $Rk2$ имеет полный обход конденсатором)

Формула не учитывает нагрузку, добавленную к катодному повторителю параллельно $Rk2$! Если мы сделаем нагрузку на катодный повторитель слишком большой, то любое увеличение коэффициента усиления V1 будет бесполезно, так как усиление и величина выходного сигнала у катодного повторителя соответственно уменьшаться. Для того чтоб избежать это, как правило сумма $R1 + R2$ должна быть не меньше $Rk2$ и R1 должен быть не менее 47K.

В нашем случае R_a имеет значение 100K, что может быть легко разбито на две части по 50K. Стандартное значение 47K достаточно близко к этому и будет достаточно большим, что бы исключить усиления нагрузки на катодный повторитель. Если $Rk1$ шунтирован, то принимая коэффициент усиления катодного повторителя 0,95, усиление V1 будет:



$$A = \frac{\mu \left(R1 + \frac{R2}{1-A} \right)}{r_a + R1 + \frac{R2}{1-A}} = \frac{100 \left(47k + \frac{47k}{1-0.95} \right)}{65k + 47k + \frac{47k}{1-0.95}} = 94.$$

Если же Rk2 не шунтирован конденсатором то усиление будет:

$$A = \frac{\mu \left(R1 + \frac{R2}{1-A} \right)}{r_a + R1 + \frac{R2}{1-A} + Rk(\mu + 1)} = \frac{100 \left(47k + \frac{47k}{1-0.95} \right)}{65k + 47k + \frac{47k}{1-0.95} + (0.82 \times (100 + 1))} = 87.$$

Это показывает, что конденсатор, шунтирующий катодный резистор имеет теперь гораздо меньшее влияние на коэффициент усиления схемы, благодаря начальной нагрузке. Во многих случаях это может быть полезно, так как позволяет избавиться от применения катодного конденсатора для более «хрустящего», менее замыленного звучания овердрайва лампы V1 и в тоже время получения высокого уровня усиления, чтоб подгрузить следующие каскады.

Конденсатор C1 нужен для развязки по постоянному напряжению. В обычных схемах его значение принималось бы большим, чтоб R2 имел подгрузку на всех звуковых частотах, хотя для гитарных усилителей это не обязательно. Не обращая внимание на незначительную величину выходного сопротивления катодного повторителя, сопротивление включенное последовательно с C1 будет R1 || (R2+r_a). В первом приближении, спад на -3дБ будет на частоте:

$$f \approx \frac{1}{2\pi RC}$$

Где:

$$R = R1 \parallel (R2 + r_a)$$

C = номинальная ёмкость конденсатора C1

Для уменьшения усиления на очень низких частотах мы можем вести расчёт относительно частоты 100Гц:

$$R1 \parallel (R2 + r_a) = \frac{R1(R2 + r_a)}{R1 + R2 + r_a} = \frac{47k \times (47k + 65k)}{47k + 47k + 65k} = 33k\Omega.$$

$$C \approx \frac{1}{2\pi \times 33k \times 100} = 48nF.$$

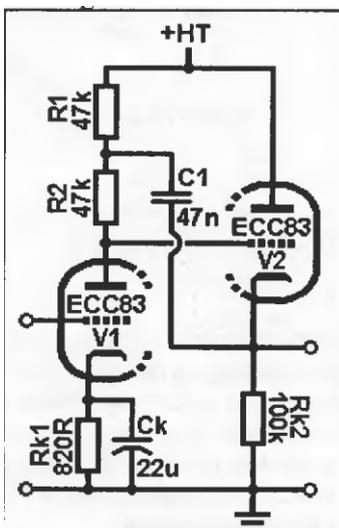
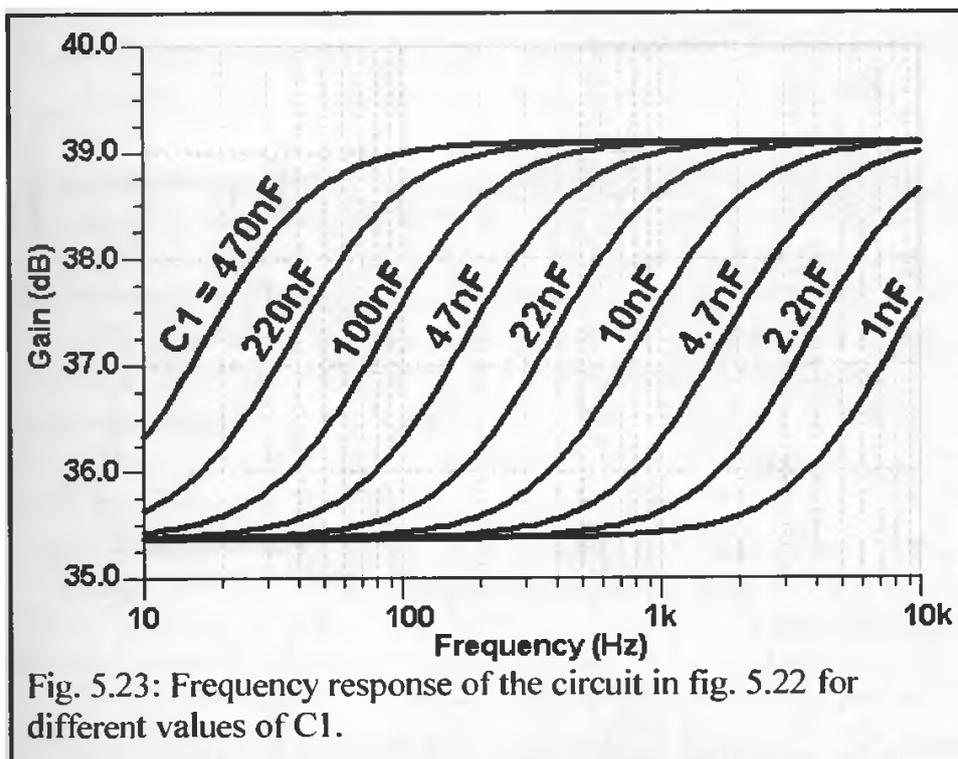


Fig. 5.22: Bootstrapping V1 increases the total gain to around 90 (39dB)!

Таким образом принимая значение 47нФ, при этом конденсатор должен быть рассчитан на полное напряжение питания. Конечный вариант схемы приведён на рисунке 5.22 (необходимые компоненты, такие как сеточный блокиратор и прочие, не показаны для облегчения понимания схемы). Схема была протестирована с лампой Mullard ECC83 и имела фактическое усиление около 90-95, в зависимости от смещения лампы V1. Это значительное увеличение усиления с низкими затратами! Частотная характеристика всей схемы, с различными номиналами конденсатора C1, при полном шунтировании Rk2 показана на рисунке 5.23. Где ясно видно что усиление на частотах без «погрузки» составляет около 60, поднимаясь до 90 по достижении полного эффекта.



Амплитуда выходного сигнала V1 повышается за счёт увеличения сопротивления нагрузки. Тем не менее, этот каскад имеет ограничение положительной полуволны в результате ограничения сеточного тока в катодном повторителе, так что полный размах амплитуды выходного сигнала в схеме почти не изменяется и составляет 130В. Если б катодный повторитель имел более низкое значение r_A , то амплитуда могла бы быть больше. Отметим, что нет сильного вреда тону звука от этой модификации и она, может быть, смело добавлена в конструкцию Hi Gain усилителей. Однако, поскольку такой эффект подгрузки можно рассматривать как тип положительной обратной связи (хотя и катодный повторитель имеет усиление меньше единицы) эффект компрессии увеличится и это даст ещё больше сустейна в звуке. В существующем усилителе конденсатор C2 может быть добавлен в качестве опционального переключателя для смены характера усиления, на пример функции винтаж/модерн.

Ещё одним преимуществом этой схемы является стойкость к старению ламп, поскольку катодный повторитель со временем почти не снижает своего коэффициента усиления и триодная часть тоже. Поскольку усиление V1 вынужденно подойти к значению μ общее усиление схемы не меняется даже с весьма изношенными лампами.

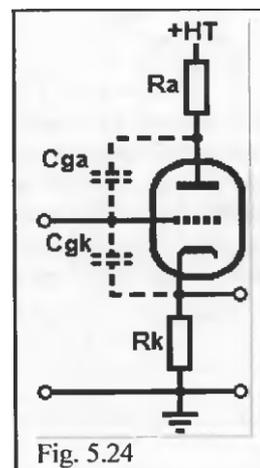
Итоговые формулы

XXVIII Усиление катодного повторителя

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

XXIX Усиление, при условии что μ гораздо больше 1

$$A \approx \frac{\mu}{\mu + 1}$$



XXX Входная ёмкость

$$C_{in} = C_{ga} + C_{gk}(1 - A)$$

Если учесть что $C_{gk}(1-A)$ очень мало, то для аудио частот будет $C_{in} = C_{ga}$

XXXI Внутреннее сопротивление катода

$$r_k = \frac{R_a + r_a}{\mu + 1}$$

(R_a принимается равным нулю)

XXXII Выходное сопротивление

$$Z_{out} = \frac{r_a}{\mu + 1} \parallel R_k$$

Так $Z_{out} = r_k \parallel R_k$

XXXIII Выходная ёмкость при условии что R_k гораздо больше чем r_k и μ больше единицы.

$$Z_{out} \approx r_k \approx 1/g_m$$

XXXIV Абсолютный максимум амплитуды выходного сигнала (проводимость класса A1)

$$V_{O(max\ p-p)} = \frac{HT}{1 + r_a / R_k}$$

XXXV Входное сопротивление применительно к рисунку 5.25, при условии не шунтированного R_b

$$Z_{in} = \frac{R_g}{1 - \frac{A \cdot R_k}{R_k + R_b}}$$

XXXVI Входное сопротивление применительно к рисунку 5.25, при условии шунтированного R_b

$$Z_{in} = \frac{R_g}{1 - A}$$

Обозначения на формулах и рисунках 5.24 и 5.25

g_m - транспроводимость лампы в её рабочей точке

μ - фактор усиления лампы

r_a – сопротивление анода лампы

HT – величина напряжения питания

Все сопротивления берутся в Омах. Все ёмкости в Фарадах.

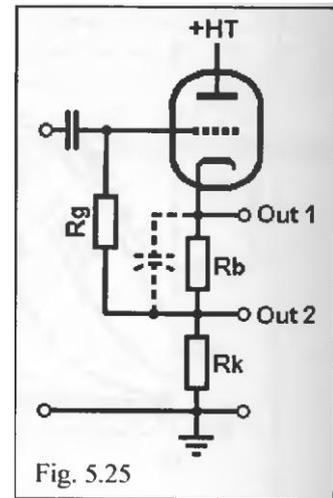


Fig. 5.25