

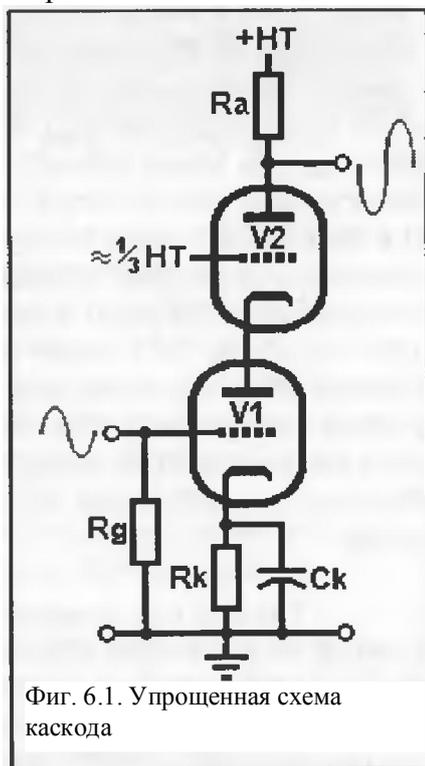
Глава 6: Каскод

Понятие каскода. Эффект напряжения экранной сетки.

Получение анодных характеристик графически. Основные параметры каскода. Проектирование каскода. Каскоды с повышенным током.

Итоговые формулы

Каскод – это один из представителей целого семейства усилительных каскадов, известных как «надстроечные» (totempole) устройства, поскольку они как бы размещаются вверху друг над другом. Каскод использует два триода и, хотя создан он еще в 1930ых, но стал популярным только во время широкого распространения использования сверхвысокочастотных цепей в телевидении, радарх и т.д., из-за своей очень широкой полосы усиливаемых частот. В звуковых устройствах он часто рассматривался как заменитель пентода, со всеми его преимуществами: высоким усилением, широкой шириной полосы частот и аналогичными характеристиками искажений, но в то же время без присущих недостатков реального пентода, таких как, например, тепловой шум, микрофонный эффект и более высокая стоимость. На закате эры широкого использования ламповых усилительных каскадов, были разработаны несколько двойных триодов, которые были предназначены специально для использования в каскодных цепях и «надстроечных» применениях,



Фиг. 6.1. Упрощенная схема каскода

такие как, например, ECC84 / 6CW7, 6BK7, 6BQ7, 6BZ7 и ECC88 / 6DJ8, последний из которых очень популярный в современном hiFi из-за своей отличной линейности. В гитарных усилителях, тем не менее, есть прижившийся стандарт, чтобы использовать ECC83 / 12AX7 из-за своей универсальной доступности и низкой стоимости. Тем не менее, как будет потом показано, ECC83 вероятно является наименее подходящим из всех триодов для использоваться в каскодном включении! ECC82/12AU7 дает намного лучшие результаты в каскодном включении (любые триоды могут быть использованы в проектах и автор рекомендует экспериментировать)

Понятие «каскод»:

Понятие «каскод» можно рассматривать как аббревиатуру от «каскад триодов, имеющих аналогичные пентоду характеристики».

Упрощенная каскодная цепь показана в рис. 6.1 и даже визуально имеет сходство с пентодом, так как сетка верхнего триода имеет похожее включение с экранной сеткой пентода и имеет аналогичное назначение (но не идентичное).

С рисунка видно, что нижний триод, V1, работает с нагрузкой, которая являет собой входной импеданс со стороны катода верхнего триода, V2, который имеет весьма небольшое

значение (обычно несколько сотен Ом). Следовательно, V1 работает как усилитель крутизны или преобразовывает напряжение в ток, и позволяет управлять током, текущим через V2.

Следовательно, V1 дает очень небольшое усиление по напряжению, поэтому влияние эффекта Миллера сильно уменьшается, и поэтому каскод хорошо подходит для работы в высокочастотных цепях. Конечно, для гитарного применения это расширение частоты более излишнее, чем требуется первоначально.

На сетке V2 должно быть фиксированное напряжение и для максимального усиления она должна быть зашунтирована конденсатором, как и экранная сетка пентода. Другими словами, входной сигнал подается на катод, в то время, как сетка заземлена по переменному току. Таким

образом, V2 включен как усилитель с общей или заземленной сеткой, и сетка экранирует катод от влияния изменения напряжения на аноде, что в свою очередь дает весьма низкое значение входной емкости катода является также очень низким уровнем, что и дает широкую полосу усиливаемых частот. В отличие от пентода, сетка V2 почти не потребляет ток, поэтому отсутствует эффект сеточной компрессии, что дает преимущество для высококачественного звукоусиления, но в то же время является недостатком для гитарного звукоусиления.

Такая схема дает высокий коэффициент усиления по напряжению, поскольку крутизна почти не меняется, подобно пентоду, дающему большее усиление, в сравнении с большинством триодами. Тем не менее, коэффициент усиления каскода не столь высок в сравнении с двумя последовательными каскадами на триодах. К счастью, характеристики, которые имеет при перегрузе каскод, достаточно полезны в гитарном применении, чтоб жертва в 2 триода не была столь серьезной.

Поскольку триод V1 работает как обычный каскод с общим катодом, хотя и с низким коэффициентом усиления по напряжению, он все равно инвертирует сигнал. Так как сигнал подается на катод триода V2, то такое включение не инвертирует сигнал. В результате такой комбинации включений получается инвертирующий усилительный каскод, как и пентод.

Триоды соединенные последовательно также соединены и по питанию, но выходной сигнал нижнего триода проходит и сквозь верхний триод (можно сказать, что они каскадированы), т.е. они связаны и по переменному току (больше, чем двухтакт).

Эффект напряжения экранной сетки:

Основным управляющим элементом в каскоде является напряжение на сетке верхнего триода, которую мы будем называть экранной сеткой (g_2) для упрощения. Так как верхний триод должен быть нормально смещен для правильной работы, его сетка должна иметь меньший потенциал, чем на катоде верхнего триода, и даже ниже, чем на аноде нижнего триода.

Но так как разница в несколько вольт большой роли не играет, то обычно принимают, что напряжение экранной сетки равняется (и определяет) анодное напряжение нижнего триода при выборе точки покоя. Обычно это напряжение будет в районе от 80В до 100В или около $1/3$ НТ(напряжения питания). Потенциал ниже 80В во много триодах дает небольшое усиление или непредсказуемую работу в каскоде (если эти триоды специально не разработаны для применения в каскодном включении, хотя ECC82/12AU7 – является приятным исключением), так что 80В принимается за самый меньший допустимый предел для обычных триодов. Более высокое напряжение увеличивает крутизну и, следовательно, возможный коэффициент усиления, но, как будет показано, будет увеличиваться несимметричность полуволн выходного сигнала.

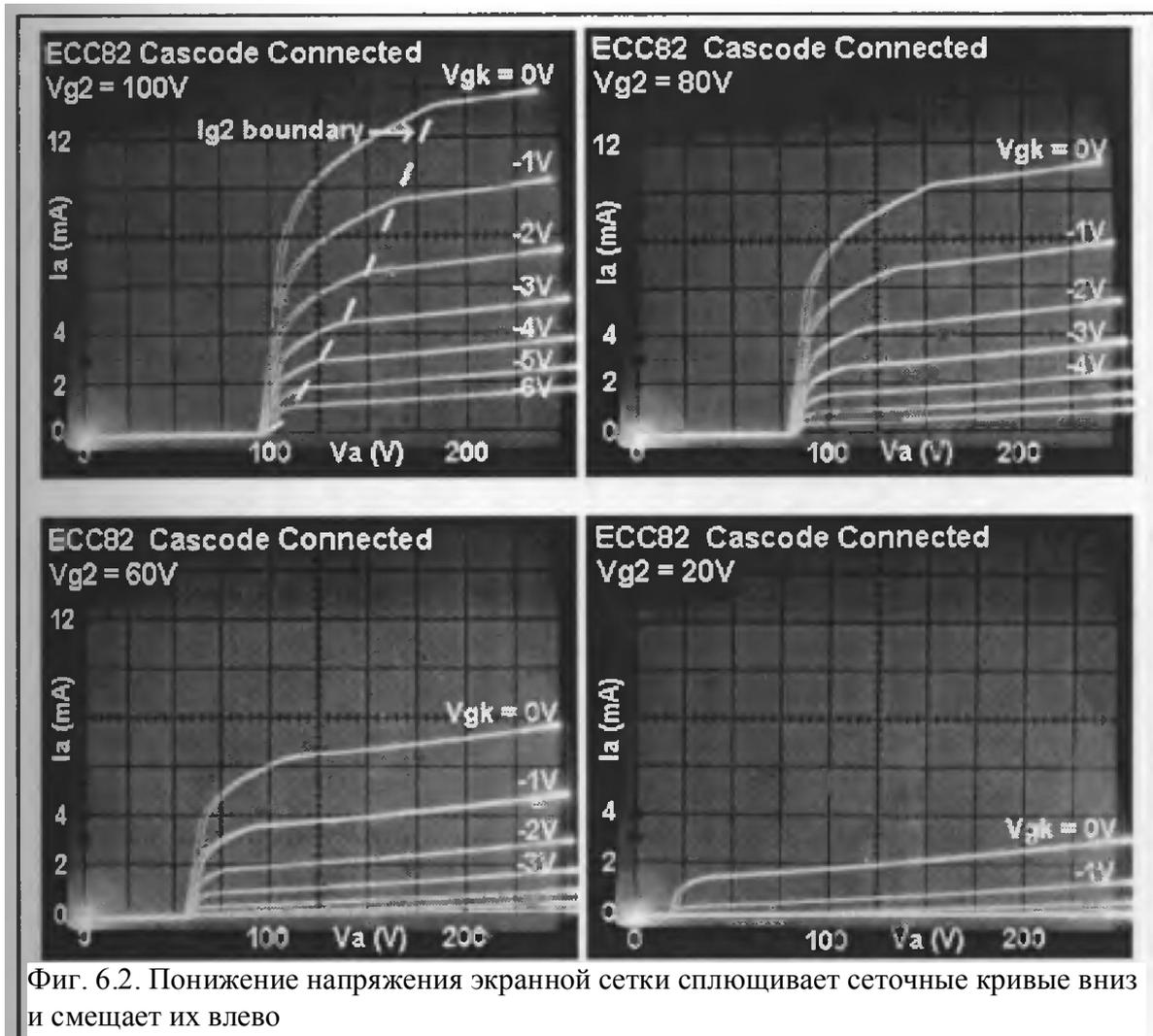
Наилучший способ оценить эффект напряжения экранной сетки - изучать статические анодные характеристики каскода при разных величинах V_{g_2} , как мы это делали для пентода в главе 3. Осциллограммы на фиг. 6.2 показывают измеренные характеристики ECC82 / 12AU7, которые получены при разных напряжениях на нижнем аноде.

Для удобства сравнения, анодный ток, анодное напряжение и сеточные кривые отмасштабированы для возможности визуального сравнения на каждом из графиков. Отметим, что анодное напряжение шкалы взяты между анодом верхнего триода и катодом нижнего триода. Таким образом каскод рассмотрен как единое целое.

Наиболее очевидное - характеристики имеют сходство с пентодными, за исключением того, что они смещаются вправо на величину напряжения на экранной сетке. Причина этого очевидна - если анодное напряжение падает ниже напряжения экранной сетки, тогда сигнал какой угодно величины не сможет вызвать анодного тока через верхний триод. Поэтому размах максимальной амплитуды выходного сигнала от пика до пика каскода всегда ограничен значением НТ- V_{g_2} .

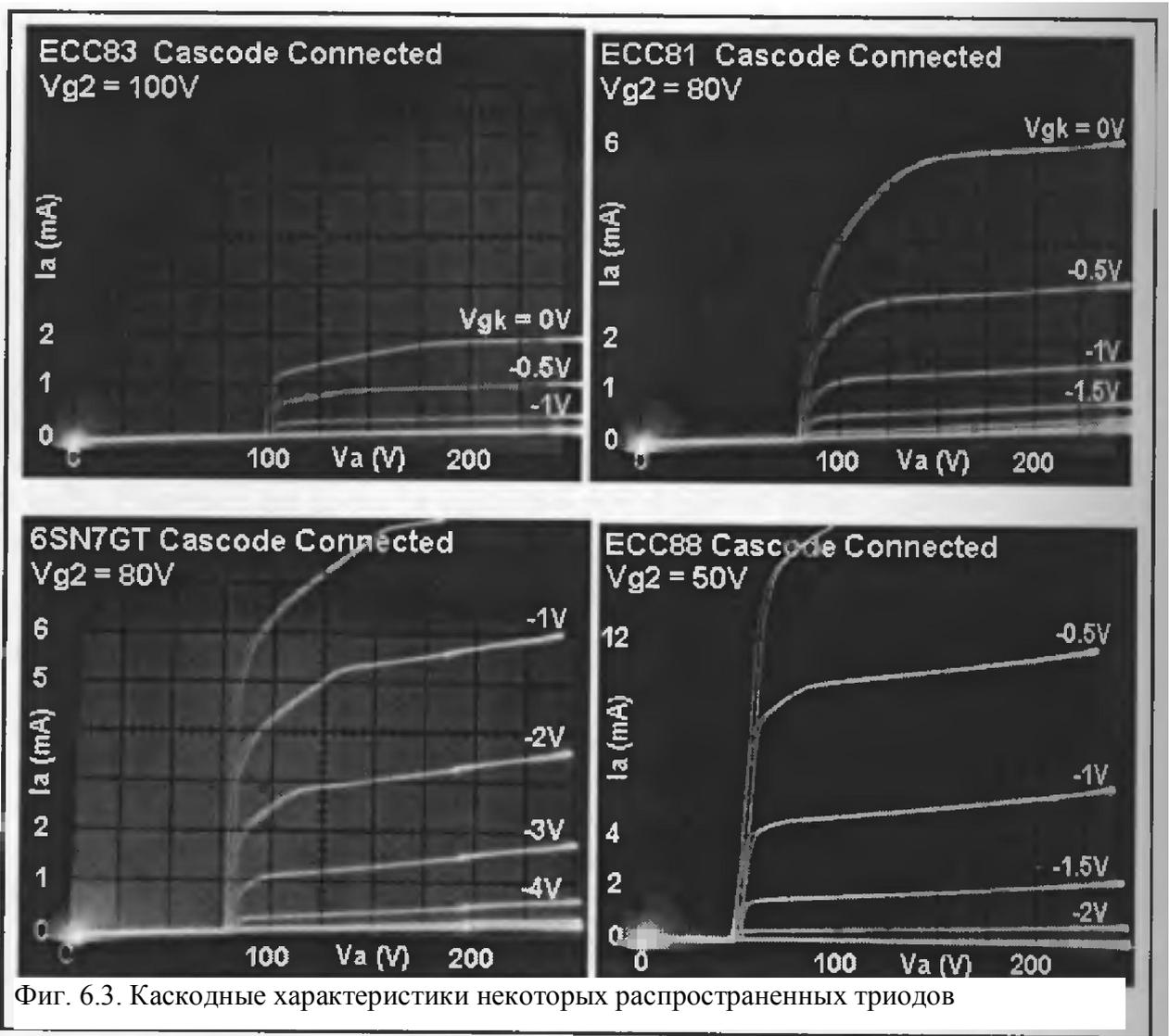
Другая особенность на заметку - отчетливая модуляция на кривых около перегиба, который выделяет точку, в которой верхний триод начинает вызывать ток сетки (указанно пунктирной линией на верхнем графике).

Более низкие напряжения экранной сетки сплющивают кривые вниз, поскольку уменьшение анодного напряжения V_1 , которое уменьшает и собственную проводимость, а следовательно способность менять ток через V_2 . Это уменьшает возможное усиление, а кривые смещаются влево от максимально возможных колебаний выходного сигнала. В отличие от пентода, анодное сопротивление r_a каскода не увеличивается значительно при уменьшении напряжения экранной сетки и не дает значительное улучшение своей линейности.



Фиг. 6.2. Понижение напряжения экранной сетки сплющивает сеточные кривые вниз и смещает их влево

Для сравнения на фиг. 6.3 показаны характеристики каскодов некоторых распространенных триодов показаны, из которых видно, что ECC83/12AX7 дает очень небольшое усиление даже с напряжением 100В на экранной сетке. Это является следствием их низкой крутизны. ECC81/12AT7 дают немного лучшие характеристики и могут быть хорошим выбором для hi-fi. Тем не менее, большой ток сетки дает «постный» оттенок при перегрузе, делая это непопулярным для использования в гитарном звукоусилении (большой сеточный ток является также причиной того, что перегиб на кривых имеет плавное округление). 6SN7GT имеет аналогичные характеристики как у ECC82, что и вполне ожидаемо, так как они очень похожие лампы, и обе очень популярны для гитары и hi-fi. ECC88/6DJ8 дает технически наилучшие показатели среди всех представленных,



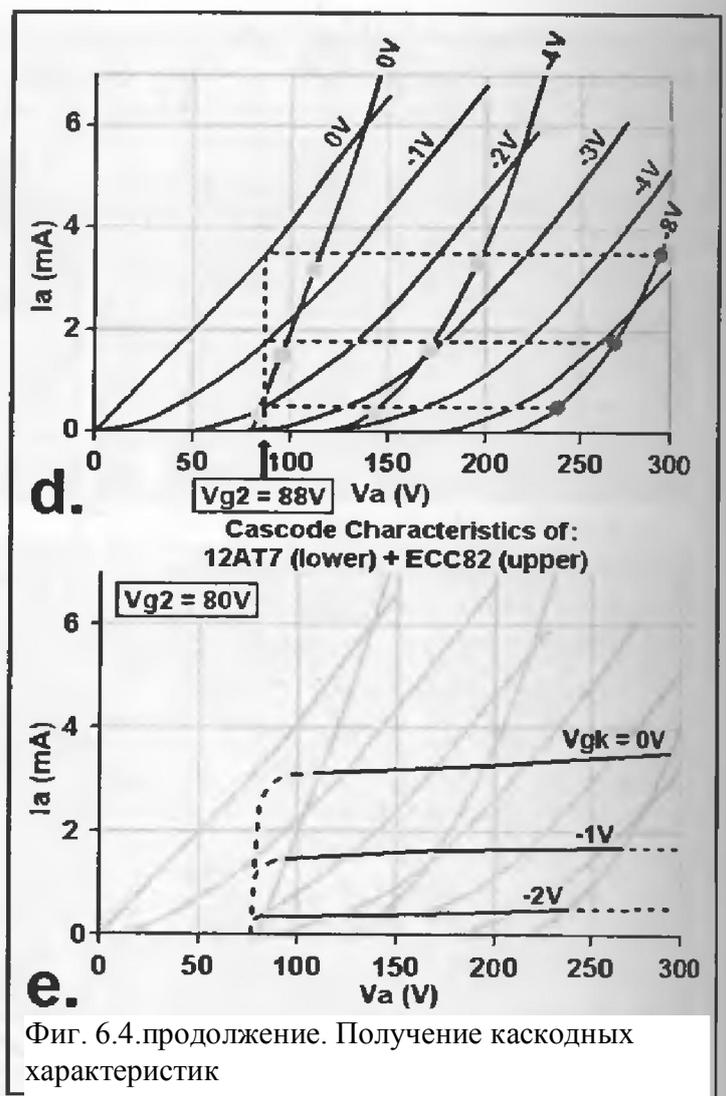
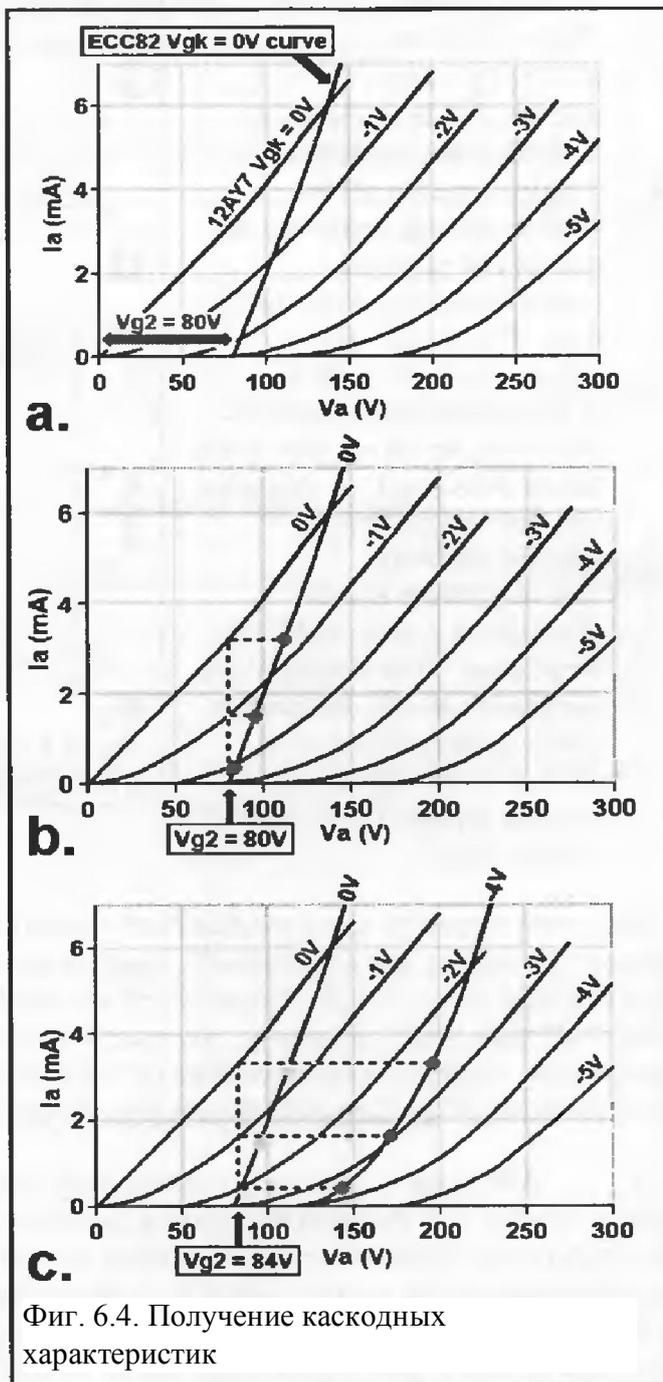
Фиг. 6.3. Каскодные характеристики некоторых распространенных триодов

давая крутизну более 5 мА/В, и в зависимости от смещения, и могут давать на самом деле очень большое усиление.

Тем не менее, это сравнительно дорогая лампа и имеет другое размещение накала, чем в ECC83, так что она редко используется в гитарных усилителях. Следовательно, наиболее в этой главе будет изучаться использование ECC82/12AU7 в каскоде.

Получение анодных характеристик графически:

Для тех, кто не имеет прибора для снятия вольтамперных характеристик, статические анодные характеристики каскода могут быть получены из обычных триодных вольтамперных характеристик. Используя этот метод, мы можем получить вольтамперные характеристики при соединении разнотипных триодов в каскод. Точность такого метода не абсолютна, но он достаточно точен в большинстве случаев. Например, в качестве нижнего триода мы захотим использовать 12AY7, а в качестве верхнего - ECC82/12AU7. Именно такой метод даст нам достаточно точный результат в любых комбинациях триодов.



Фиг. 6.4.продолжение. Получение каскодных характеристик

- Для начала надо взять паспортные ВАХ нижнего триода (12AY7). На них наложить кривую $V_{gk} = 0V$ верхнего триода (ECC82), но сместив ее вправо на величину равную сумме напряжения экранной сетки и напряжения смещения этой кривой. Это соответствует смещению на 80В (фиг. 6.4а)
- Затем надо отметить анодные токи, когда анодное напряжение через $V1$ равняется V_{g2} для каждой величины V_{gk} , и проектировать их на новую сеточную кривую. Эти моменты отмечены жирными точками на фиг. 6.4б и соответствуют сеточным кривым $V_{gk} = 0V, -1V$ и $-2V$.
- Далее строится следующая новая сеточная кривая для верхнего триода, при этом смещение будет определяться как $V_{g2} - V_{gk_{\text{верх}}}$. В нашем случае смещение равно $-4V$ и это значит, что кривая должна быть смещена на $80V - (-4V) = 84V$.

- Мы снова отмечаем анодные токи при напряжении V_1 равном 84В ($V_{g2} - V_{gk_{\text{верх}}}$) и проектируем их на новую сеточную кривую и отмечаем жирными точками (фиг. 6.4с).
- Следующие кривые строят точно таким же способом, как было описано выше. На фиг.6.4d сеточная кривая для ECC82 $V_{gk} = -8В$ кривая добавлена и смещена вправо на $V_{g2} - V_{gk_{\text{верх}}}$: $80 - (-8) = 88В$. Аналогично отмечены анодные токи.
- Наконец, соединяя все соответствующие точки, мы получим каскодные характеристики, показанные на фиг.6.4е. Колена полученных кривые зависят от сеточно-токовых характеристик верхнего триода, а так как они редко публикуются, так что эта область может быть только оценена (она показана набросками).
- Кривая максимальной мощности рассеивания анодом также может быть построена. Для этого кривую максимальной мощности рассеивания анода верхнего триода надо сместить вправо на значение V_{g2} (здесь не отображено).

Этот метод показывает немного фундаментальные свойства каскода: мы определили, что входная чувствительность и g_m в значительной степени равные и почти полностью определяются нижним триодом при $V_a = V_{g2}$. Следовательно, если нам нужны высокая крутизна каскода или высокая входная чувствительность, то мы должны выбрать триод для V_1 из соответствующими свойствами, тогда как характеристики V_2 имеют только легкое влияние на конечный результат в каскаде, поэтому почти любой триод может быть использован в качестве верхнего.

Хотя каскод часто описывается как способ «имитировать пентод, используя триоды», на самом деле получить «пентодный тон» от каскода из-за того, что в случае каскода отсутствует эффект компрессии экранной сеткой. Также есть трудности в области, где в верхнем триоде внезапно начинает протекать ток сетка из-за жесткого ограничения первоначального сигнала. С другой стороны, каскод представляет из себя хороший входной каскад из-за своего высокого усиления и широкой полосы частот, хотя, для получения этого преимущества в характеристиках искажений, надо перегрузить, то есть использовать далее в преампе. В сущности, каскод можно считать чем-то средним между настоящим пентодом и триодом, с точки зрения тона и полезности для гитарных применений.

Основные характеристики каскода:

Ламповый каскод не является хорошей математической моделью, так как много его параметров зависят от величин r_1 и g_1 , которые же зависят от выбора рабочей точки, особенно при низких анодных напряжениях и токах. В следующих формулах индекс 1 указывает на нижний триод V_1 , а индекс 2 указывает на верхний триод V_2 .

Усиление:

Усиление стандартного каскода из полностью шунтированными катодами:

$$A = \frac{\mu_1(\mu_2 + 1) R_a}{R_a + r_{a2} + r_{a1}(\mu_2 + 1)} \quad \text{XXXVII}$$

Но если оба триода идентичны, тогда это упрощается к:

$$A = \frac{\mu(\mu + 1) R_a}{R_a + r_a(\mu + 2)} \quad \text{XXXVIII}$$

Для большинства триодов μ значительно больше, чем 1, так что можно упростить до:

$$A = \frac{g_m \cdot R_a}{1 + \frac{R_a + r_a}{\mu \cdot r_a}} \quad \text{XXXIX}$$

Входная емкость:

Входная емкость каскода имеет очень низкое значение, поскольку более нижний триод дает очень небольшое усиление напряжения. Усиление нижнего триода:

$$A_{lower} = \frac{\mu_1 \cdot r_{k2}}{r_{a1} + r_{k2}}$$

Где:

$$r_{k2} = \frac{R_a + r_{a2}}{\mu_2 + 1}$$

Подставив это в формулу VII мы находим общую входную емкость:

$$C_{in} = C_{gk} + C_{ga} \left(\frac{\mu_1 \cdot r_{k2}}{r_{a1} + r_{k2}} \right) \quad \text{XL}$$

Но с учетом того, что для нижнего триода $\mu_1 + r_{k2}$ незначительно больше, чем $r_{a1} + r_{k2}$, формулу входной емкости можно упростить до $C_{in} \approx C_{gk} + C_{ga}$, с допустимой небольшой неточностью. В результате, большие сопротивления в цепи управляющей сетки могут быть использованы без риска завала высоких частот в каскаде, как это имеет место в пентоде.

Выходное полное сопротивление:

Предположим, что все катодные резисторы зашунтированы, тогда полное выходное сопротивление каскода будет равно:

$$Z_{out} = R_a \parallel r_{a2} + r_{a1} (\mu_2 + 1) \quad \text{L}$$

Для большинства триодов $r_{a2} + r_{a1}(\mu_2 + 1)$ гораздо больше, чем R_a , так что и полное выходное сопротивление может быть аппроксимировано до: $Z_{out} = R_a$, как и для пентода.

Если катоды незашунтированы, тогда полное выходное сопротивление:

$$Z_{out} = R_a \parallel (R_{k1} (\mu_1 + 1) + r_{a1} + R_{k2}) \cdot (\mu_2 + 1) + r_{a2}$$

Но так как правая часть выражение намного больше, чем R_a , поэтому полное выходное сопротивление может все также аппроксимировано как: $Z_{out} = R_a$. Следовательно, катодное шунтирование имеет минимальное влияние на полное выходное сопротивление каскода.

Проектирование каскода:

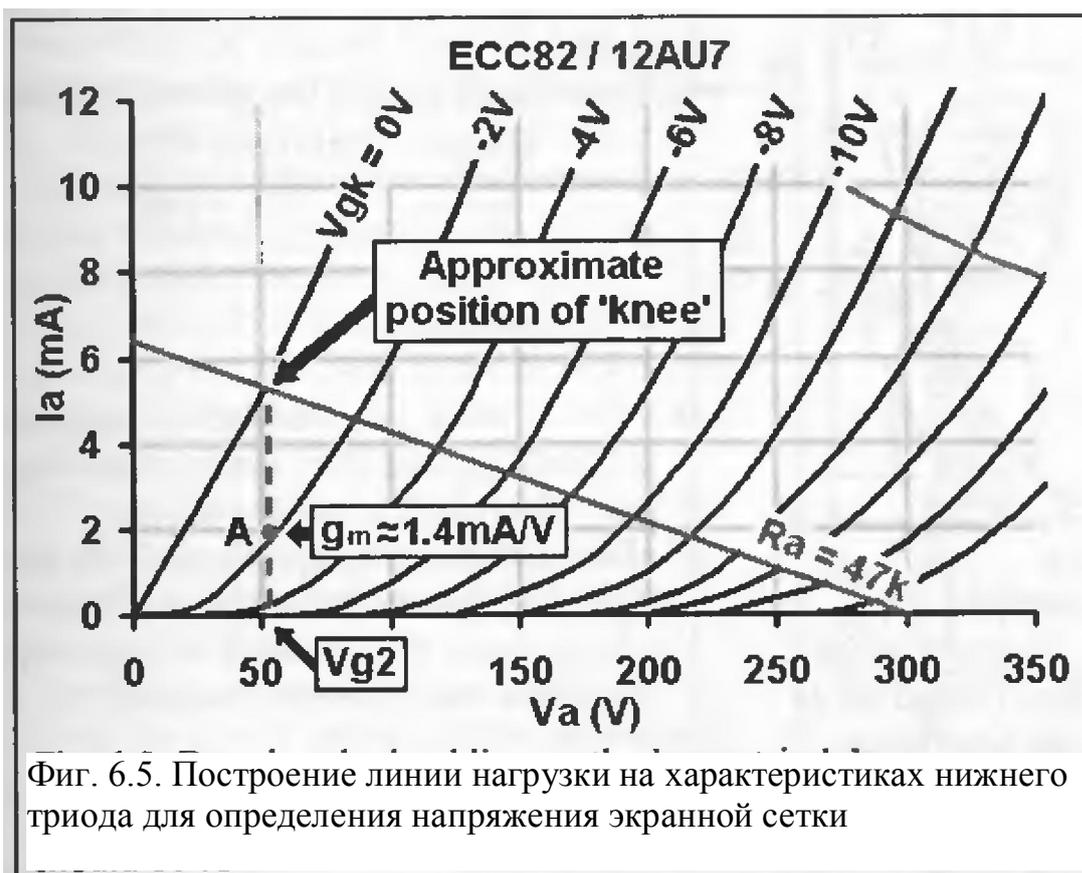
При проектировании каскода для гитарного применения многие проектные соображения такие же, как и для слабосигнального пентода [глава 3], за исключением того, что они менее повторяемы. Все каскодные, спроектированные на бумаге, вероятно, наименее соответствуют реальности из-за различных нелинейностей и разбросов реальных ламп. Тем не менее, методы, описанные здесь должны обеспечить хороший старт для модификаций.

В идеале, мы должны провести линию нагрузки через или чуть колена кривых сетки, для наибольшего подобия пентодному звуку. При проведении нагрузочной линии значительно выше колена, искажения будут более подобны к триодным. Это будет хорошим выбором для триодного каскада из большим усиление.

Хотя каскод способен давать очень высокое усиление, но в гитарных усилителях слишком большое усиление на единственном каскаде может быть помехой, лишаящей усилитель отзывчивости, а также увеличивающей риск микрофонного эффекта и паразитной генерации. В

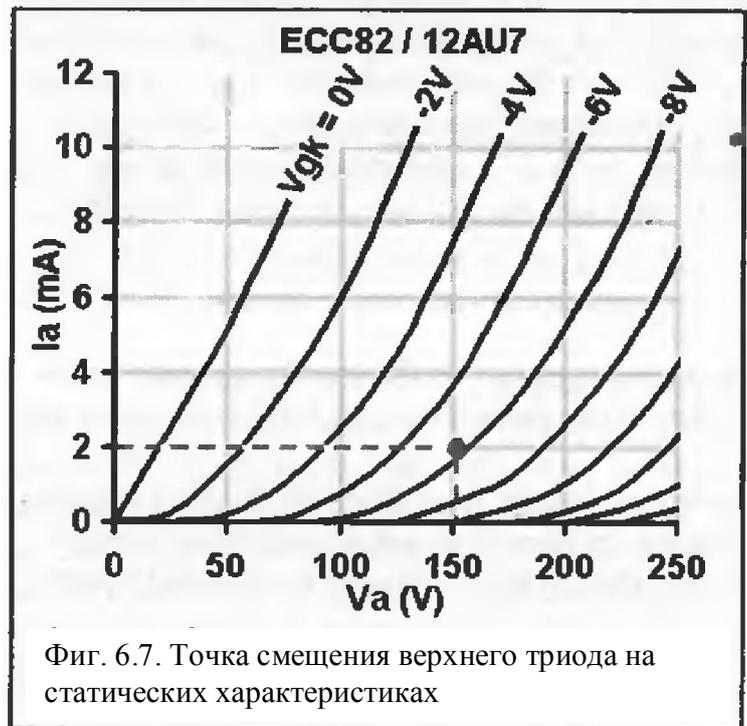
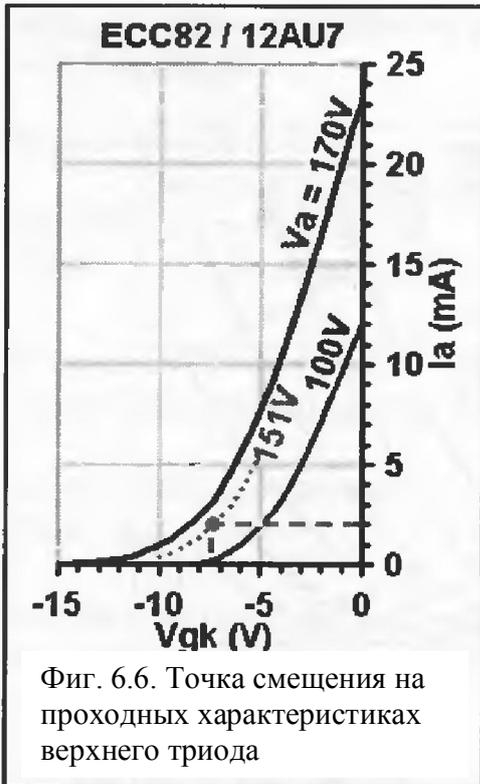
слабосигнальном пентоде рекомендуется, чтобы коэффициент усиления не превышал 100. Для каскода, в разумных пределах, он может быть при необходимости повышен до 200.

Наиболее простой способ начать — выбрать сопротивление анодной нагрузки R_a и задать характеристики каскода линией нагрузки. Выше обнаружив, что почти все характеристики каскода определяются нижним триодом, проектный процесс значительно упрощается: мы рисуем линию нагрузки на графике статических анодных характеристик нижнего триода. В этом случае $HT = 300B$ и используется ECC82/12AU7. Нагрузка 47kОм выбрана для того, чтобы гарантировать большую амплитуду выходного сигнала, но не такой большой, чтобы снизить анодные токи, где каскад может плохо работать. На фиг. 6.5 показана линия нагрузки. Следует напомнить, что это не реальная линия нагрузки, по которой работает нижний триод (для него она близка к вертикальной), просто она используется для выбора напряжения электродов.



Фиг. 6.5. Построение линии нагрузки на характеристиках нижнего триода для определения напряжения экранной сетки

Когда мы построим линию нагрузки, которая проходит через колено характеристик, приближенное экранное напряжение, которое нам требуется, берется равным анодному напряжению, где линия нагрузки пересекается из сеточной кривой $V_{gk} = 0V$ (показано вертикальной линией). В этом случае это будет около 55В, что есть очень удобным, поскольку это ниже максимального допустимого напряжения накал-катод верхнего триода, и поднятие потенциала нагревателя не требуется.



Нижний триод нагружен на полное внутреннее катодное сопротивление верхнего триода, которое имеет достаточно низкое значение, что мы можем принять его равным нулю (вертикальная нагрузочная линия). Следовательно, мы можем взять входную чувствительность так, как это отображено проведенной линией на фиг. 6.5. Предлагается что чувствительность будет равна $4V_p$, хотя сеточные кривые очень искривлены в данной области, так что реальная величина будет немного больше. Точкой А обозначено смещения величиной $-2V$. Анодный ток в этой точке будет приблизительно равным $2mA$, так что применив закон Ома, мы находим сопротивление необходимого катодного резистора:

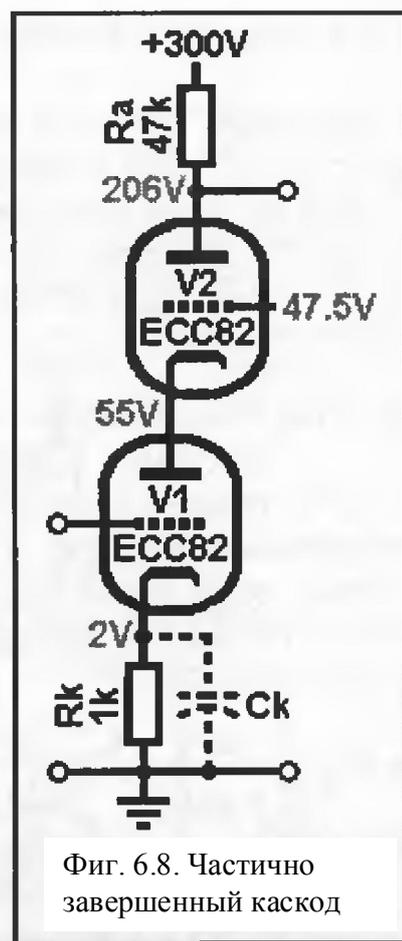
$$R = \frac{V}{I} = \frac{2}{0.002} = 1K$$

(Мы могли бы выбрать более высокое напряжение экранной сетки, чтобы линия нагрузки проходила ниже колена. Тем не менее, выбранная точка смещения на проведенной линии может быть только ниже линии нагрузки).

На практике мы обычно находим ток покоя (следовательно и напряжение смещения), который немного больше, чем предположенный, поскольку колено действительно не выгибается вниз строго вертикально к абсциссе, но различие между этими токами обычно будет очень небольшое.

g_m полученная в точке смещения дает нам приближенное значение g_m и каскода в целом. На фиг. 6.5, при анодном напряжении $55V$ g_m приблизительно равно $1.4mA/V$, $\mu = 19$ и $r_a = 14K\Omega$. Мы можем посчитать усиление цепи полностью:

$$A \approx \frac{g_m \cdot R_a}{1 + \frac{R_a + r_a}{\mu \cdot r_a}} = \frac{0.0014 \cdot 47 K}{1 + \frac{47 K + 14 K}{19 \cdot 14 K}} = 53.5 (36.8 dB)$$



Фиг. 6.8. Частично
завершенный каскод

Далее мы должны найти фактическое напряжение экранной сетки, и для этого есть два легких пути сделать это. Первый - это использование графика передаточных характеристик, приведенного в заводских характеристиках.

Поскольку мы уже знаем, что анодный ток будет 2мА, то падение напряжения на анодном резисторе в режиме покоя: $V = IR = 0.002 \times 47K = 94V$.

Мы также определили анодное напряжение нижнего триода, и следовательно напряжение катода верхнего триода, которое равно 55В. В режиме покоя напряжение анод-катод верхнего триода должно быть: $300 - 94 - 55 = 151V$. График передаточных характеристик показан на фиг. 6.6 и кривая для $V_a = 151$ показана точками. Точка смещения для анодного тока 2мА помечена и указывает на напряжение смещения -7.5В. Поскольку мы знаем, что катодное напряжение будет 55В, фактическое напряжение экранной сетки должно быть: $55 - 7.5 = 47.5V$.

Второй метод - снова вычислить напряжение анод-катод, а тогда взять точку смещения на графике статических анодных характеристик.

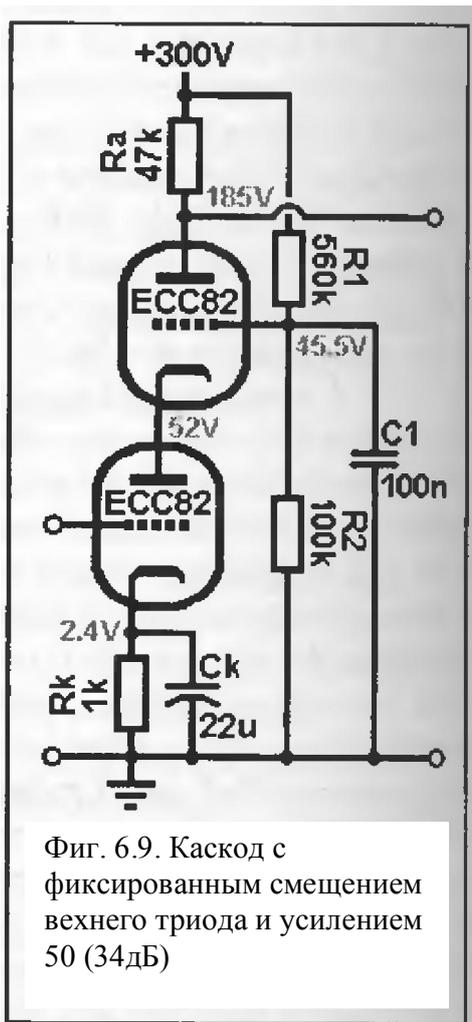
Это показано на фиг. 6.7 и точка смещения также указывает на напряжение смещения -7.5В и, следовательно, экранное напряжение 47.5В. Любой метод может быть использован, чтобы получить экранное напряжение, хотя график статических анодных характеристик часто легче понятен, чем график передаточных характеристик.

Частично завершенная цепь показана на фиг. 6.8, с ожидаемым напряжением.

Применение фиксированного смещения в верхнем триоде:

Теперь, когда необходимые напряжения известны, мы должны решить, как будет организовано смещение верхнего триода.

Традиционный метод - это использование фиксированного смещения в виде делителя напряжения из НТ, чтобы обеспечить необходимое напряжение сетки. Так как сетка не потребляет ток (при нормальных условиях), можно использовать большие величины сопротивлений, чтобы избежать избежать дополнительной нагрузки на блок питания. Можно бы было использовать потенциометр для точной установки напряжения, но на практике в этом нет необходимости, поскольку реальные лампы редко имеют в точности такие же характеристики, которые поданы в заводских инструкциях, и по которым мы вычисляли напряжения. Делитель, состоящий из резисторов сопротивлением 560К и 100К обеспечит экранное напряжение $300 \times (100K / 560K + 100K) = 45.5V$, которое достаточно близкое к нашему расчетному значению 47.5В [фиг. 6.9]. Кроме того, нижний резистор в делителе можно заменить стабилитроном.



Экранирующий конденсатор также обычно включен для стабильного значения экранного напряжения и уменьшения сеточных шумов. Этот конденсатор не влияет на усиление цепи (поскольку через сетку не течет ток, как это происходит в экранной сетке пентода), но он влияет на характеристики перегруза. Верхняя полуволна входного сигнала будет понижать катодное напряжение верхнего триода и тогда через экранную сетку будет протекать ток. Если экранный шунтирующий конденсатор не включен, эти импульсы тока заставят колебаться экранное напряжение с амплитудой приблизительно равной напряжению верхней полуволны сигнала. Этот сигнал, смешиваясь из усиливающимся сигналом может произвести волну причудливой формы с большим количеством высших гармоник и интермодуляционных искажений. Это обычно дает жесткий и неприятный звук, хотя это очень зависит от экранного напряжения. (Интересно, что этот эффект ухудшается, если нагрузочная прямая проходит выше колена.) Экранирующий конденсатор обеспечивает более стабильное напряжение сетки и дает более компрессированный и приятный тон. Ориентировочная величина емкости конденсатора может быть рассчитана согласно:

$$C = \frac{1}{2\pi f (R1 || R2)}$$

Где:

f - нижняя частота, на которой напряжение сетки будет в значительной степени стабильным.

$$R1 || R2 = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}$$

В нашем случае $R1 || R2 = 85K$. Для обеспечения стабильности напряжения вплоть до 20 Гц:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \cdot 85K} = 93.6 \text{ нФ}$$

Самым близким по емкости будет конденсатор 100нФ. Его максимально допустимое напряжение должно быть достаточным, чтобы обеспечить нормальную работу каскада, хотя оно может быть меньше полного напряжения НТ.

Выбор катодного шунтирующего конденсатора:

Катодный шунтирующий конденсатор C_k предназначен для увеличения усиления (он несколько влияет на полное выходное сопротивление каскада). Без него происходит уменьшение усиления каскада, поскольку крутизна нижнего триода уменьшается к эффективной величине:

$$g_{m(eff)} = \frac{g_m}{1 + g_m \cdot Rk} = \frac{0.0014}{1 + 0.0014 \cdot 2000} = 0.37 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$$

Усиление этого каскода должно уменьшиться к:

$$A \approx \frac{g_{m(eff)} \cdot Ra}{1 + \frac{Ra + ra}{\mu \cdot ra}} = \frac{0.00037 \cdot 47 K}{1 + \frac{47 K + 15 K}{19 \cdot 15 K}} = 14.5 = 23(\text{дБ})$$

Ск можно рассчитать согласно формуле VI, но так как нагрузка нижнего триода сформирована внутренним катодным сопротивлением верхнего триода, поэтому формула изменяется к следующему виду:

$$Ck = \frac{1}{2\pi f Rk} \sqrt{1 + \frac{Rk(\mu l + 1)}{2\left(\frac{Ra + ra}{\mu l + 1} + ra\right) + \frac{1}{2} Rk(\mu l + 1)}}$$

Но так как $\frac{Ra + ra}{\mu l + 1}$ значительно меньше, чем ra , это может быть упрощено до:

$$Ck \approx \frac{1}{2\pi f Rk} \sqrt{1 + \frac{Rk(\mu l + 1)}{2ra + \frac{1}{2} Rk(\mu l + 1)}}$$

Где:

f - подъемная частота.

μl - коэффициент усиления нижнего триода.

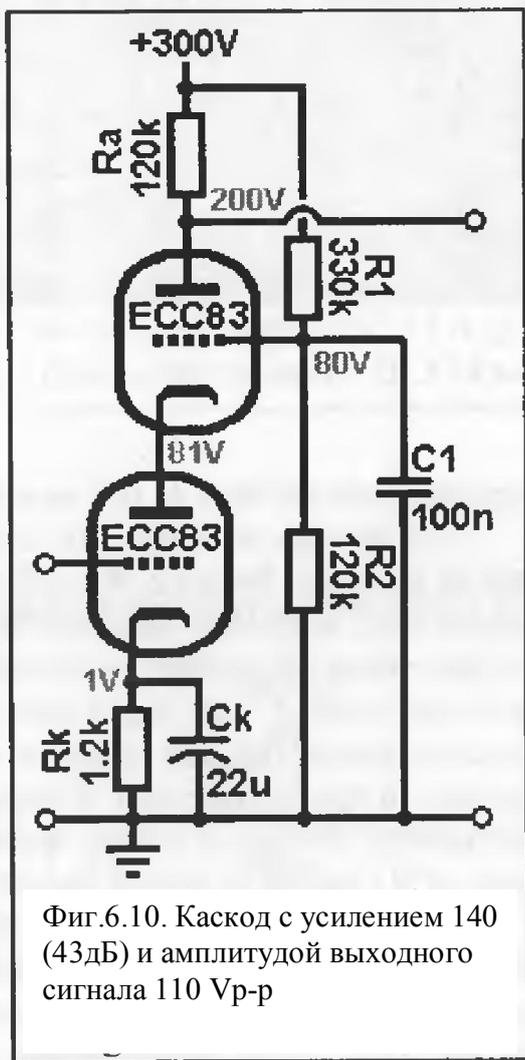
ra - внутреннее сопротивление нижнего триода.

Для полного шунтирования на подъемной частоте 10Гц необходима емкость конденсатора 19мкФ(ближайшим будет конденсатор емкостью 22мкФ).

Цепочка с результатами расчетов показана на фиг. 6.9. Этот каскад был протестирован и имеет усиление 50, близкое к рассчитанной величине 55, и амплитуду выходного сигнала 200Vp-p. Амплитуда выходного сигнала получилась меньше предсказанной величины HT-Vg2, и это является следствием невозможности достаточно точно определить ток сетки верхнего триода, который имеет значения за левой границы области Ig2 [смотрите фиг. 6.2 вверху].

Усиление можно было бы поднять повышением сопротивления резистора нагрузки Ra. Тем не менее, если сопротивление сделать слишком большим, тогда линия нагрузки будет проходить через область низких значений g_m и усиление упадет снова. Обычно оптимальная величина можно обнаружить только экспериментированием. В цепи на фиг. 6.9 максимальное усиление 80 достигнуто при нагрузке 90КОм. Тем не менее, линия нагрузки для этой величины проходит ниже колена, так что ограничение становится более жестким и более несимметричным, делая тон перегруза более агрессивным (иногда слишком агрессивным).

Для большинства стилей лучший тон получается тогда, когда линия нагрузки проходит через или очень близко к колену, даже если усиление не так же высоко как, он могло бы быть.

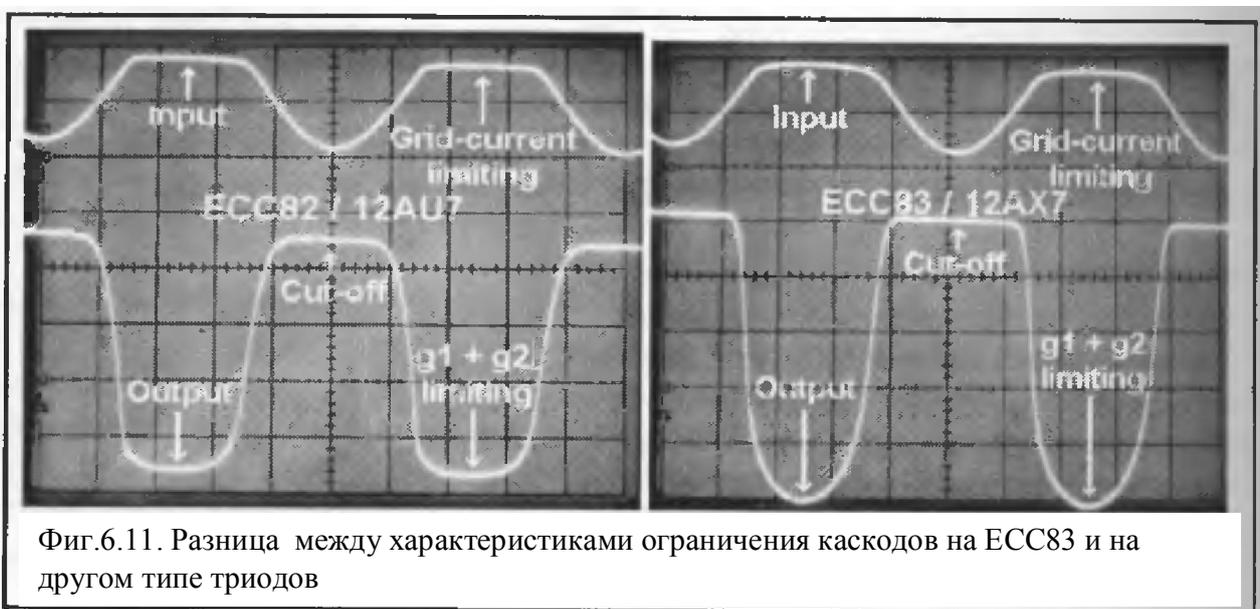


На фиг. 6.10 показана аналогичная цепь, оптимизированная для ECC83 / 12AX7. Измеренное усиление - 140, данный каскод мог бы звучать лучше, чем например с ECC82, разработанный прежде, но надо отметить, что анодный резистор нагрузки и экранное напряжение больше, что ограничивает амплитуду выходного сигнала значением 110Vp-р.

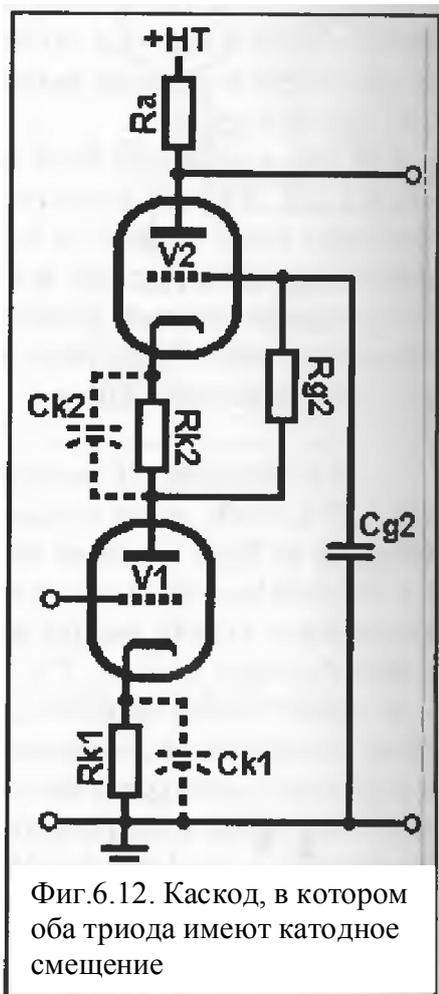
Интересно понаблюдать за различием между характеристиками ограничения каскода на ECC83 в сравнении с другими триодами. Левая осциллограмма на фиг. 6.11 показывает 200Vp-р амплитуды выходного сигнала каскода на ECC82 из сильным перегрузком входным сигналом 12Vp-р. Полное сопротивление нагрузки составляет 100КОм и, как видно, сигнал сетки в верхней части ограничен из-за появления сеточного тока ограничивать. Выходной сигнал имеет ограничение верхней полуволны по питанию и нижней из-за комбинации сеточного ограничения в обоих триодах, что смягчает ограничение и дает пентодоподобный звук.

Правая осциллограмма на фиг. 6.10. показывает поведение каскода на ECC83 с тем же входным сигналом. Сеточное ограничение и ограничение по питанию в нижнем триоде почти такие же, как и у ECC82 [смотрите главу I, фиг. 1.6]. Но 110 Vp-р выходного сигнала показывает, что ограничение в верхнем триоде совсем другое, из более мягкой и округленной нижней полуволной. Это дает тон, который менее подобен пентодному и, скорее, похож на одиночный триодный каскод из «холодным» смещением. Подобный эффект проявляется во всех других каскодных цепях с

использованием ECC83 и причины его не ясны.



Использование катодного смещения для верхнего триода



Хотя в большинстве источников предлагается установка фиксированного смещения в каскоде, катодное смещение может также быть использовано для этой цели, как показано на фиг. 6.12. Оно получается за счет дополнительного резистора смещения R_{k2} , включенный между двумя триодами.

Напряжение смещения приложено к экранной сетке через резистор стока сетки R_{g2} и при отсутствии катодного конденсатора напряжение на сетке будет стабильным. При отсутствии катодного конденсатора, сигнал с анода $V1$ будет проходить непосредственно на сетку $V2$. При небольшой разнице напряжений сетка-катод верхний триод будет сопротивляться изменению своего анодного тока, в результате чего усиление будет уменьшаться.

В более раннем примере, использовавшем $ECC82$, смещение для верхнего триода было определено значением - 7.5В, ток покоя был предложен величиной 2мА.

Применив закон Ома, мы находим величину R_{k2} :

$$R_{k2} = \frac{V}{I} = \frac{7.5}{0.002} = 3750$$

Вполне пригодной будет и стандартная величина 3.3КОм.

Конечно, присутствие резистора будет немного уменьшать ток покоя каскода. Тем не менее, поскольку мы уже наблюдали, что ток покоя получается обычно немного выше, чем предположенный, поэтому, во всяком случае, присутствие R_{k2} будет работать в нашу пользу.

Величина резистора стока сетки R_{g2} , не критическая.

Величина 1МОм наиболее распространена, хотя значительно

более низкая величина в 100КОм может быть использована для уменьшения шумов без каких-либо влияний на другие характеристики каскада.

Экранирующий шунтирующий конденсатор C_{g2} , может быть рассчитан согласно:

$$C_{g2} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot R_{g2}}$$

Где:

f - самая низкая частота, на которой напряжение сетки должно быть в значительной степени стабильным.

Для частоты 10 Гц:

$$C_{g2} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 1000K} = 15.9нФ$$

Так что можно использовать стандартную величину 22нФ. Нормальным будет даже не вычисление этой емкости, а просто использование почти стандартной величины 100нФ.

Поскольку R_{k2} увеличивает нагрузку, которая действует на $V1$, это уменьшает эффективное значение g_m и, следовательно, уменьшает усиление каскода.

Тем не менее, поскольку величина этого сопротивления не очень большая, то и уменьшение в усилении небольшое. Если нужно достичь максимального усиления, то можно добавить шунтирующий конденсатор Ck2. В разумном приближении, подъемная частота должна быть между нешунтированным и полностью шунтированным резистором Rk2.

$$f \approx \frac{1}{2\pi \cdot Ck2 \cdot Rk2}$$

Более сложные расчеты здесь не имеют необходимости, так как различие в усилении между нешунтированным и полностью шунтированным случаями очень небольшое. В этом примере для частоты 10Гц требуется емкость 4.8мкФ. Самым близким будет конденсатор 4.7мкФ из стандартного ряда, хотя может быть более удобным использовать ту же величину, которая использована для шунтирования Ck1. Значительно меньшие величины могут быть использованы для тонкого повышения высоких частот. С другой стороны, может быть желательно, чтобы оставляя Rk2 нешунтированным, поскольку отпадает необходимость использования другого электролитического конденсатора ради небольшого увеличения усиления.

Кроме того, один или оба резистора смещения могли бы быть заменены стабилитронами или светодиодами, чтобы обеспечивать необходимое смещение, для которого не надо шунтирующих конденсаторов.

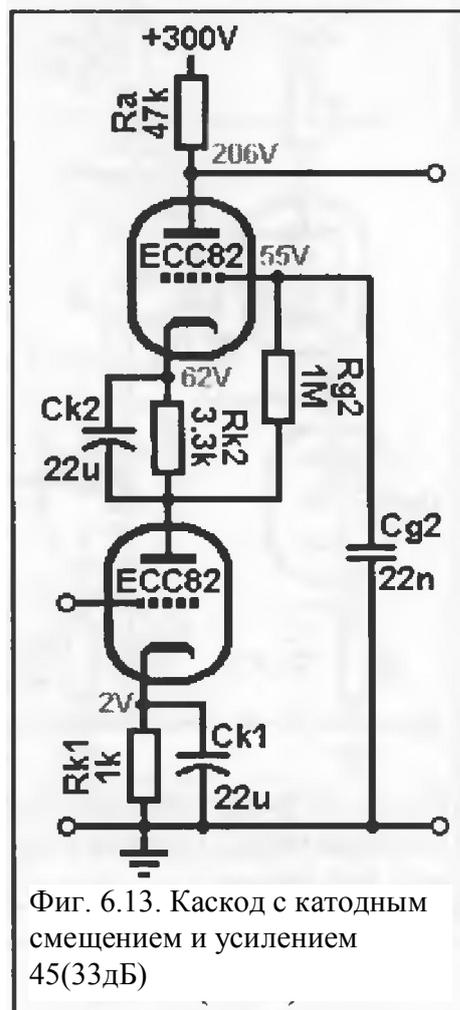
Результирующая каскодная цепь показана на фиг. 6.13 с измеренными напряжениями и как видно, что ток покоя ниже, чем для версии из фиксированным смещением.

Оказывается, что данный каскод имеет коэффициент усиления 45, который меньше, чем у версии из фиксированным смещением и причиной этого может быть более низкий ток покоя, вызывающий уменьшение gm. Максимальный коэффициент усиления 64 будет достигаться при нагрузке 180КОм. Это меньше, чем измеренный в версии из фиксированным смещением, но дело в том, что напряжение экранной сетки теперь пропорционально анодному току, который сам уменьшается при повышении сопротивления анодного резистора.

Тон этой версии каскода будет более «теплым» и «гладким», чем у версии из фиксированным смещением. Также версия не будет страдать искрением между сеткой и катодом в верхнем триоде.

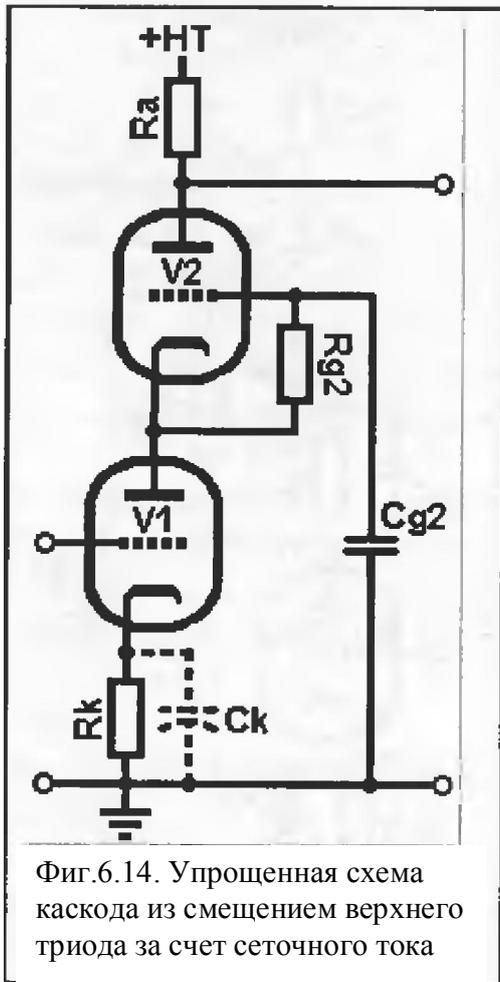
Применение тока сетки для смещения в верхнем триоде:

Вероятно, самой простой формой каскода есть схема, где верхний триод смещается за счет тока сетки, как показано на фиг. 6.14. Это более легко сделать, чем для резистивного каскада усиления, из-за присутствия экранного шунтирующего конденсатора Cg2. В отличие от резистивного каскада, где ток утечки протекает в сетку, здесь не требуется резистора стока сетки высокого сопротивления.



Фиг. 6.13. Каскод с катодным смещением и усилением 45(33дБ)

В режиме покоя на сетке верхнего триода будет нулевое смещение. Но когда сигнал начинает проходить и напряжение на катоде растет, ток заряд протекает в Cg2 через резистор стока сетки Rg2, что и вызывает наличие небольшого отрицательного напряжения сетки относительно катода. Чем больше амплитуда сигнала, тем больше будет напряжение смещения. Это дает небольшой эффект компрессии, поскольку средний ток и, следовательно, gm нижнего триода уменьшаются,



Фиг.6.14. Упрощенная схема каскода из смещением верхнего триода за счет сеточного тока

конденсатор имеет небольшую емкость, поскольку это вводит необычные характеристики искажений на низких частотах).

Так как период колебаний синусоидальной волны

$$\tau = \frac{1}{f} \text{ и постоянная времени } R_{g2} \times C_{g2}, \text{ величина } C_{g2}$$

может быть выбрана согласно:

$$C_{g2} = \frac{1}{f \cdot R_{g2}}$$

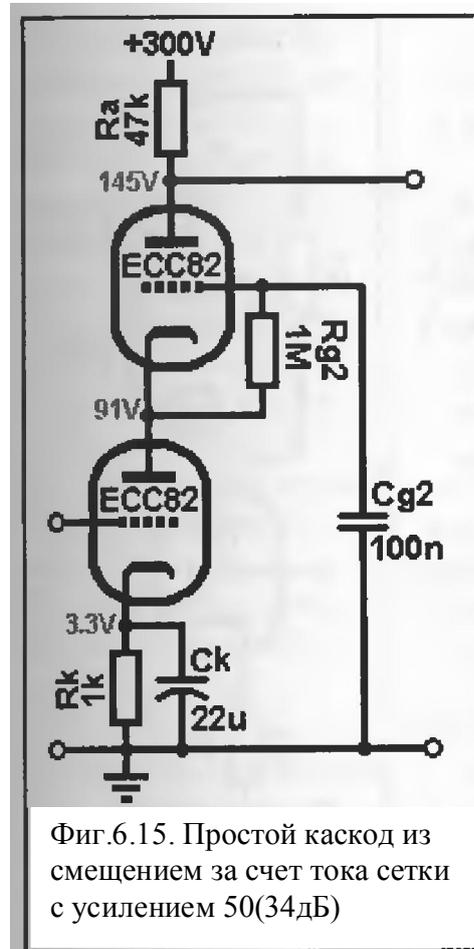
Где:

f - самая низкая частота, которая должна усиливаться без искажений.

Например, если Rg2 = 1МОм и мы произвольно берем низкую частоту 10Гц:

когда каскод жестко перегружается. Так как присутствует время задержка, пока создается напряжение смещения, переходные процессы едва присутствуют; только если поддерживается высокий уровень сигнала, тогда происходит компрессирование выходного сигнала подобно тому, как это происходит в блоке питания с ламповым выпрямлением двухтактных усилителей. Этот эффект и простота этой версии каскода делают его, вероятно, наиболее перспективным для гитарного применения. Это также полезно, поскольку уменьшается количество компонентов, которые надо корректировать при тестировании.

Сопротивление резистора стока сетки Rg2 - не критическое и можно применять типичные значения 470КОм или 1МОм. Для того, чтобы усиление и характеристики искажений каскода оставались стабильными на всей ширине полосы частот, постоянная времени, равная произведению Rg2 и Cg2, должна быть по крайней мере равной периоду колебаний на самой низкой частоте, которая должна усиливаться (хотя интересные результаты были получены, если



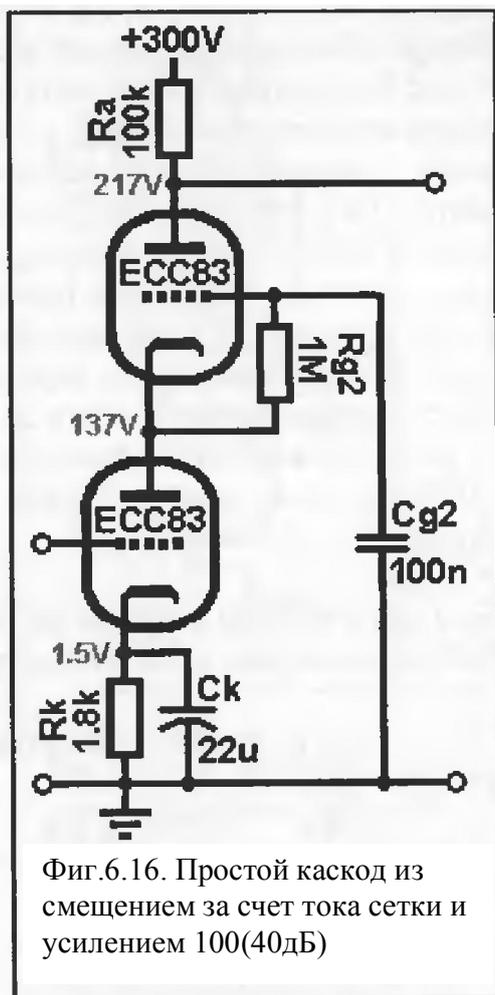
Фиг.6.15. Простой каскод из смещением за счет тока сетки с усилением 50(34дБ)

$$C_{g2} = \frac{1}{1 \cdot 10M} = 100нФ$$

Эта величина показана на фиг. 6.15 с измеренным напряжением. Отметим, что ток покоя значительно выше, чем в предшествующих схемах, поскольку верхний триод имеет нулевое смещение, пока нет входного сигнала. В случае полного перегруза, средний ток и анодное напряжение нижнего триода уменьшается к расчетному значению 51В.

На фиг. 6.16 показано аналогичную схему, оптимизированную для ECC83 / 12AX7. Измеренное усиление - 100, но амплитуда выходного сигнала снова только 110Vp-p.

Каскоды с повышенным током:



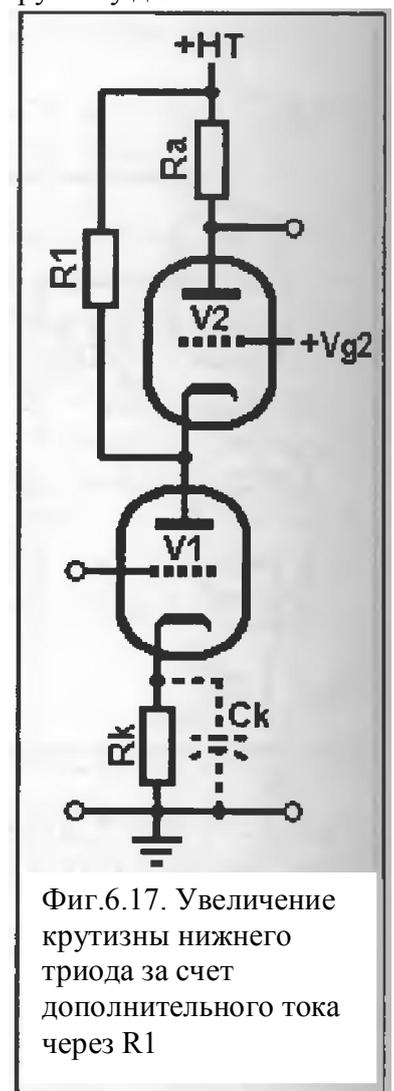
Фиг.6.16. Простой каскод из смещением за счет тока сетки и усилением 100(40дБ)

хэдрум.

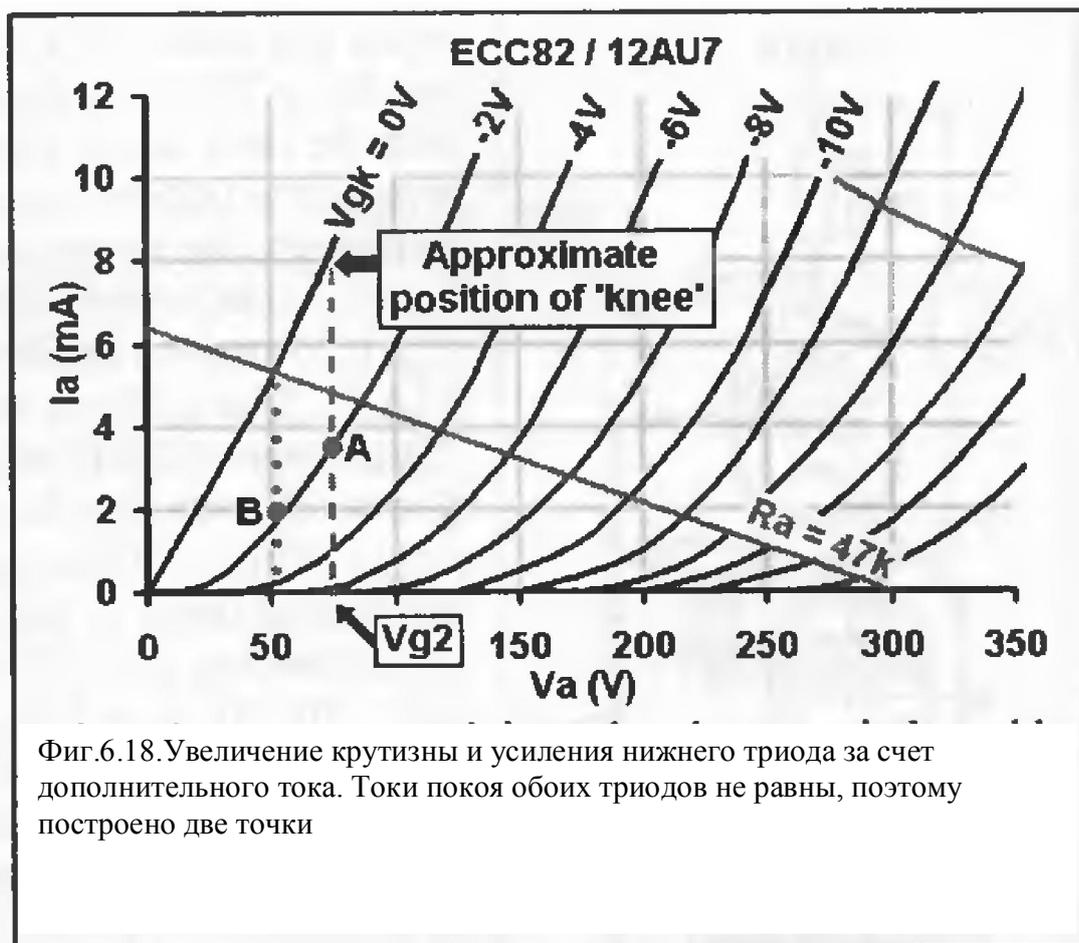
Более тонко увеличить усиление каскода без этих недостатков можно путем запитывания нижнего триода через отдельный резистор R1 от НТ, как показано на фиг. 6.17.

Характеристики такого каскада почти такие же, как и у предыдущих. Сначала линия нагрузки проводится на характеристиках нижнего триода, как и было прежде (фиг. 6.18). После того, как выбрано анодное напряжение, мы снова должны выбрать ток покоя для нижнего триода. На этот раз, тем не менее, мы хотим увеличить g_m , выбрав более высокий ток не уменьшая напряжение смещения к очень низким величинам. По этой причине

Теперь ясно, что усиление каскода очень зависит от крутизны нижнего триода. Следовательно, может быть желательным, чтобы увеличить крутизну для более высокого усиления и избегания высокого напряжения на экранной сетке(которое уменьшает амплитуду выходного сигнала и устанавливает более высокое напряжение нагреватель-катод изоляции) и не использовать другой тип лампы. Подобная задача могла бы казаться невыполнимой, если мы не вспомнить, что g_m может быть повышена путем установки более высокого тока покоя. Тем не менее, если мы просто увеличим ток через целый каскод, не изменяя напряжения на экранной сетке и анодное, мы будем вынуждены установить более горячее смещение верхнего триода, которое устанавливает точку смещения ближе к области токов экранной сетки, что сильно ограничивает



Фиг.6.17. Увеличение крутизны нижнего триода за счет дополнительного тока через R1



Фиг.6.18. Увеличение крутизны и усиления нижнего триода за счет дополнительного тока. Токи покоя обоих триодов не равны, поэтому построено две точки

анодное напряжение 75В выбрано так, чтобы линия нагрузки теперь прошла ниже колена. Также, поскольку мы можем пропустить в триод из НТ любое значение тока, точка смещения может быть везде: и на линии нагрузки, и даже выше линии нагрузки.

Точка смещения помечена символом А и ее напряжение смещения равно -2В при ток покоя 3.5мА. Катодный резистор смещения должен быть: $R = \frac{V}{I} = \frac{2}{0.0035} = 571$. Наиболее близким будет стандартное сопротивление резистора величиной 560Ом. Емкость катодного шунтирующего конденсатора следует можно точно таким же методом, как и раньше.

В этой точке g_m приблизительно равна 2.2мА/В, $\mu = 19$ и $r_a = 8.6K\Omega$, расчетное усиление равно:

$$A \approx \frac{g_m \cdot R_a}{1 + \frac{R_a + r_a}{\mu \cdot r_a}} = \frac{0.0022 \cdot 47K}{1 + \frac{47K + 8.6K}{19 \cdot 8.6K}} = 77(37.7\text{дБ})$$

Теперь мы должны выбрать ток покоя для верхнего триода. Он ограничен линией нагрузки и диапазон возможных токов показан пунктирной линией. Для среднего значения смещения выбран ток 2мА, помеченный точкой В.

Смещение верхнего триода можно организовать любым из методов, описанных раньше, так как через эту часть цепи не протекает дополнительный ток нижнего триода.

Далее мы должны выбрать величину тока, текущего через резистор R1. Мы уже выбрали общий ток в нижнем триоде равным 3.5мА. Так как анодный ток верхнего триода выбрано 2мА,

разность этих токов должна течь через R1. Необходимый дополнительный ток будет $3.2 - 2 = 1.5\text{мА}$.

Мы также выбрали анодное напряжение нижнего триода равным 75В. Падение напряжения на R1 должно быть:

$$HT-V_{a1}=300-75=225\text{В}$$

Согласно закону Ома необходимое сопротивление:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{225}{0.002} = 112.5\text{К}$$

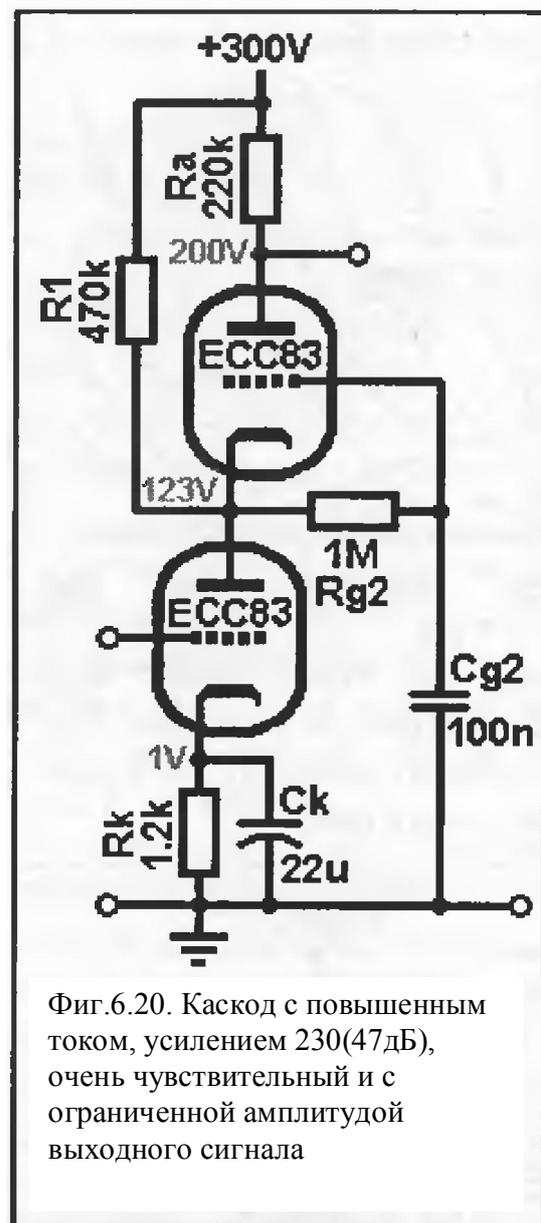
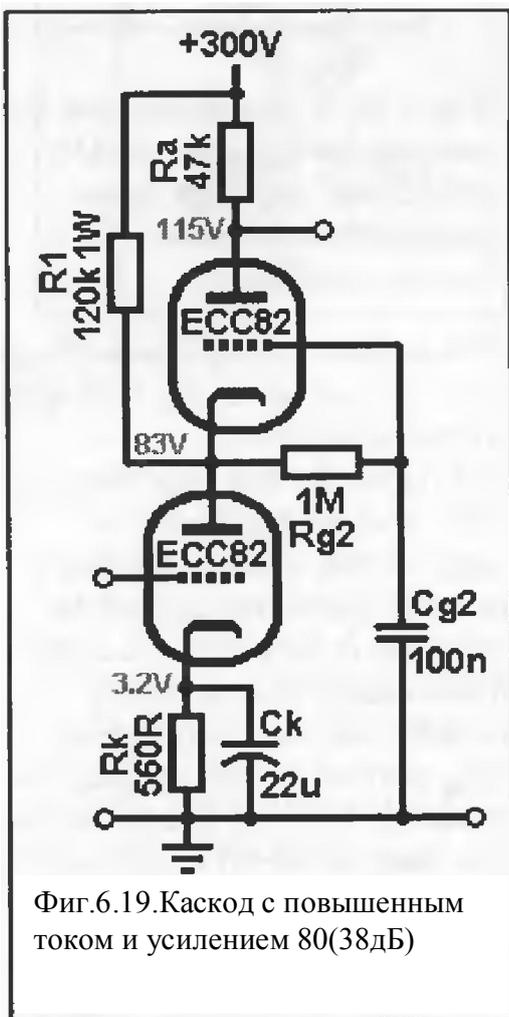
Стандартная величина 120КОм должна подойти для этой цели. Рассеиваемая мощность должна быть близкой к:

$$P = I^2 R = 0.002^2 \cdot 120\text{К} = 480\text{мВт}$$

Мощности резистора на 1Вт должно быть достаточно.

Результирующая схема показана на фиг. 6.19.

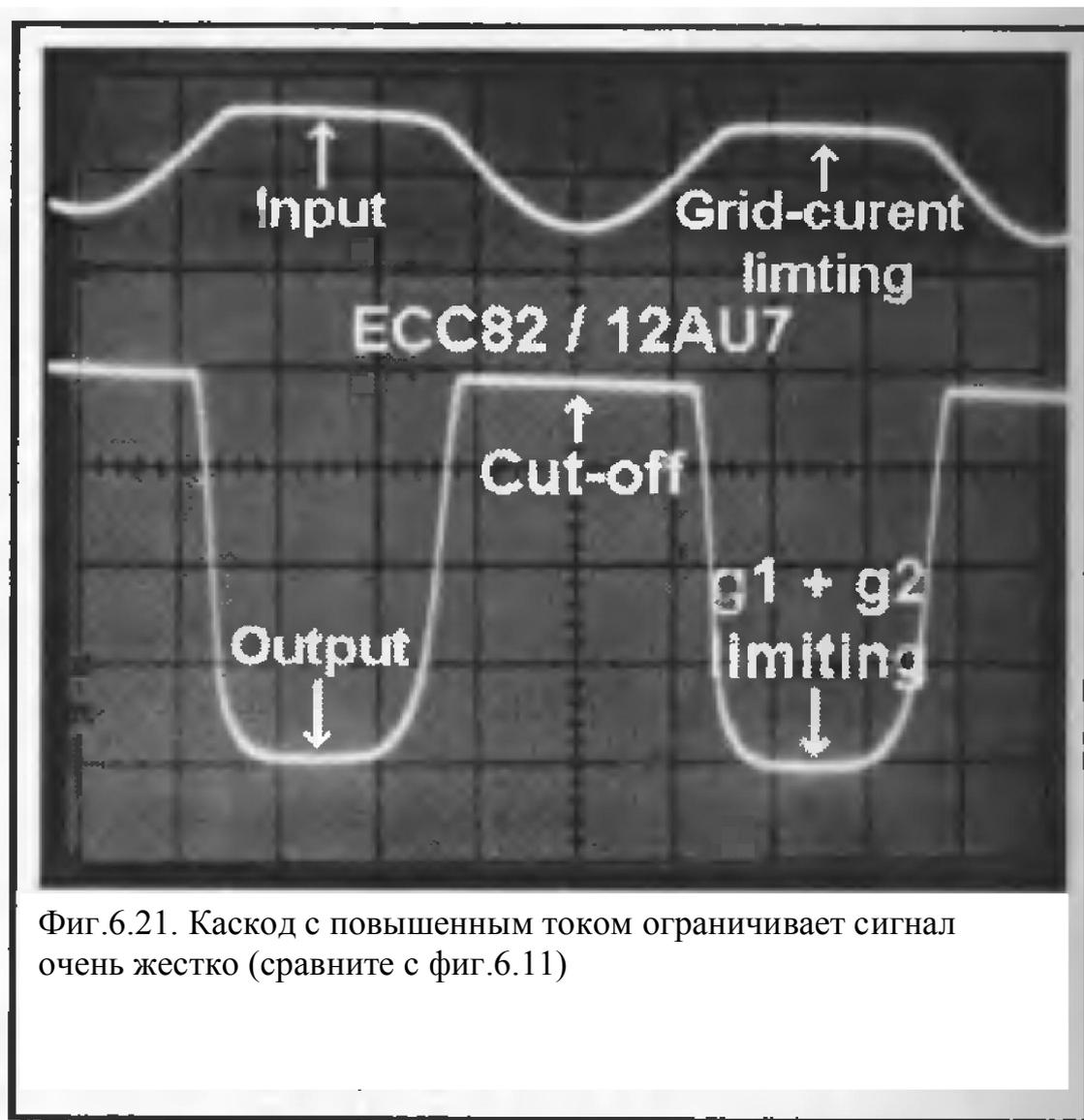
Поскольку для смещения верхнего триода используется сеточный ток, ток покоя получился выше расчетного, но среднее значение тока падает до ожидаемой величины, когда каскад перегружается. Измеренное усиление равно 80 и амплитуда выходного сигнала около 200Vp-p. При установке R_a 100КОм и R_k в 200 Ом усиление этого каскода достигает 115 с той же амплитудой выходного сигнала, при том, что эту лампу относят к категории с «низким усилением». (Хотя, из-за горячего смещения, каскад надо сильно перегрузить, чтобы получить полную амплитуду выходного сигнала). На фиг. 6.20 показано аналогичную цепь с использованием ECC83/ 12AX7. Это каскод достигает чрезвычайного усиления 230! Тем не менее, за такой высокое усиление приходится расплачиваться амплитудой выходного сигнала при полном перегрузе равной 110Vp-p. Конечно, после этого каскода надо использовать меньшее межкаскадное ослабление. Ограничение этого каскода происходит уже при 350мVp-p входного сигнала, так что наилучше он подойдет для установки в качестве входного каскода преампа (он может служить полезной альтернативой пентодам EF86 во входном каскаде в стиле Vox [смотрите главу 3, фиг. 3.8] с использованием триодов, которые менее склонным микрофонному эффекту, хотя при таких



высоких уровнях усиления для некоторых триодов подобная проблема тоже будет иметь место. Если необходимо, то R1 можно удалить или отключить, уменьшив при этом усиление до 150.

В заключение надо отметить, что в каскаде с повышенным током ограничение происходит более резко при перегрузе, чем в других формах каскода (это справедливо для любого типа триодов). Это проиллюстрировано осциллограммой на фиг. 6.21, на которой показано 200Vp-p выходного сигнала каскода из фиг. 6.19, когда происходит перегруз 12Vp-p входного сигнала (полное сопротивление источника равно 100КОм).

Причина этой очень острой отсечки неясная, но автор предполагает, что когда «обычный» каскод перегружается, при этом уменьшается ток в верхнем триоде и его га очень быстро увеличивается, достигая значений сотен МОм, вызывая смещение линии нагрузки нижнего триода, которая становится менее крутой и этим «смазывает» переход в ограничение. В версии с повышенным током, нагрузка формируется параллельным соединением верхнего триода и R1, что устанавливает предел, выше которого полное сопротивление нагрузки не может повыситься, тем самым уменьшая смазывающий эффект.



Фиг.6.21. Каскод с повышенным током ограничивает сигнал очень жестко (сравните с фиг.6.11)

Итоговые формулы:

XXXVII: Усиление каскода с полностью шунтированными катодами:

$$A = \frac{\mu_1(\mu_2 + 1) R_a}{R_a + r_{a2} + r_{a2}(\mu_2 + 1)}$$

XXXVIII: Усиление каскода с полностью шунтированными катодами и идентичными триодами:

$$A = \frac{\mu(\mu + 1) R_a}{R_a + r_a(\mu + 2)}$$

XXXIX; Усиление каскода с полностью шунтированными катодами и идентичными триодами, когда $\mu \gg 1$:

$$A = \frac{g_m \cdot R_a}{1 + \frac{R_a + r_a}{\mu \cdot r_a}}$$

Если нижний R_k нешунтированный, тогда g_m можно заменить на:

$$g_{m(\text{eff})} = \frac{g_m}{1 + g_m \cdot R_k}$$

Подъемная частота из-за шунтирующего катодного конденсатора:

$$f \approx \frac{1}{2\pi \cdot C_k \cdot R_k} \sqrt{1 + \frac{R_k(\mu_1 + 1)}{2r_{a1} + \frac{1}{2} R_k(\mu_1 + 1)}}$$

Где:

f - подъемная частота.

μ_1 - коэффициент усиления нижнего триода.

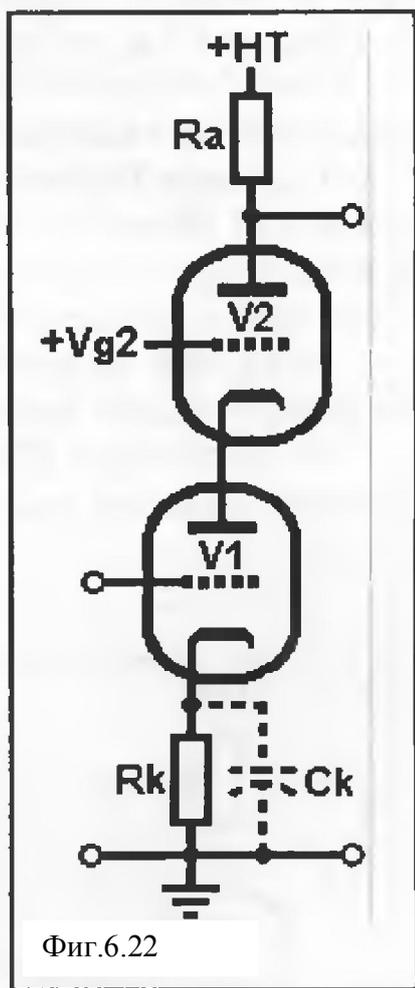
r_{a1} – внутреннее сопротивление нижнего триода.

XL: Общая входная емкость

$$C_{in} = C_{gk} + C_{ga} \left(\frac{\mu_1 \cdot r_{k2}}{r_{a1} + r_{k2}} \right)$$

Где:

$$r_{k2} = \frac{R_a + r_{a2}}{\mu_2 + 1}$$



Но величина $\frac{\mu_1 \cdot r_{k2}}{r_{a1} + r_{k2}}$ редко значительно больше единицы, C_{in} может упростить до:

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

L: Полное выходное сопротивление:

$$Z_{out} = R_a \parallel r_{a2} + r_{a1} (\mu_2 + 1)$$

Для большинства триодов $r_{a1} + r_{a1}(\mu + 1) \gg R_a$, так что Z_{out} можно упростить до:

$$Z_{out} \approx R_a$$

Во всех формулах и рисунках, как и на фиг. 6.22, индекс 1 указывает нижний триод V1, а индекс 2 указывает на верхний триод V2.