

Soldano Super Lead Overdrive

Классический предусилитель с эффектом Overdrive.

(Первоисточник <http://www.ampbooks.com/home/classic-circuits/soldano-slo-preamp-1/>)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Усилитель Soldano Super Lead Overdrive (SLO-100) известен своим характерным хай-гейновым звучанием. И на самом деле, как позже мы рассчитаем, входная чувствительность канала Overdrive этого предусилителя составляет менее 1мВ при максимальном положении регулятора громкости. Это более чем на порядок выше, в сравнении с классическими усилителями, такими как, например, Fender Bassman и его последователи.

Солдановский регулятор Master Volume размещен между модифицированным темброблоком, взятым из схемы Fender Bassman 5F6-A, и фазоинвертором усилителя мощности. Установив на максимум регулятор Master Volume, мы получим классический перегруз оконечника в классе АВ. Повернув регулятор Master Volume в минимальное положение, мы отдаем всё формирование перегруза предусилителю. Он создаст свои собственные вторые и третьи гармоники и даст столько сустейна, что его хватит на перекур Вашей группы. Вернувшись, Вы обнаружите: что он все еще звучит! И вот здесь, где-то между минимальным и максимальным положением регулятора Master Volume находится царство магии, которое является уникальной и тщательной разработкой усилителя Soldano. А теперь обо всем этом подробнее.

1. Первый каскад.

1.1. Условия по постоянному напряжению.

На входе первого каскада (рисунок 1) мы видим резистор утечки сетки (1МОм) и блокировочный резистор (68кОм), а на выходе блок усиление яркости (Bright boost) (параллельно соединенные 470кОм и 2нФ).

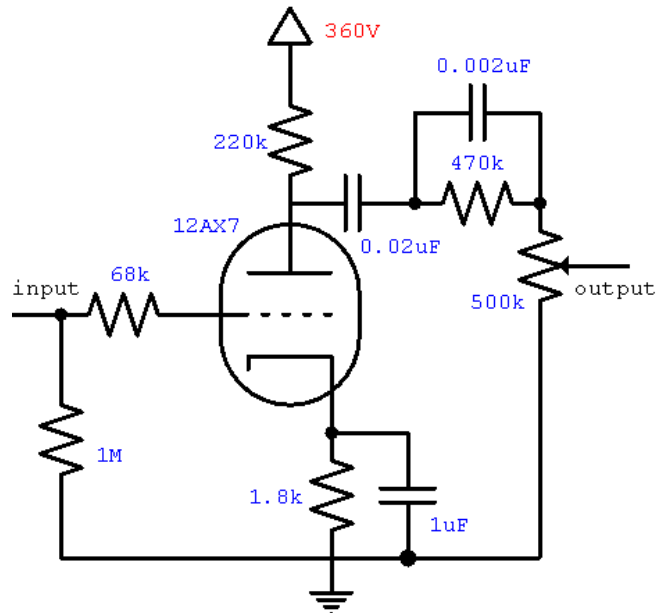


Рисунок 1: Схема первого каскада предусилителя Soldano SLO-100

Линия нагрузки по постоянному току строится по двум точкам: первая точка - это напряжение питания, откладываемое по оси постоянных анодных напряжений (plate voltage), а вторая точка на оси токов (current). Ее значение рассчитывается как

$$\frac{360V}{220k\Omega + 1.8k\Omega} = 1.6mA.$$

Результат построения показан на рисунке 2.

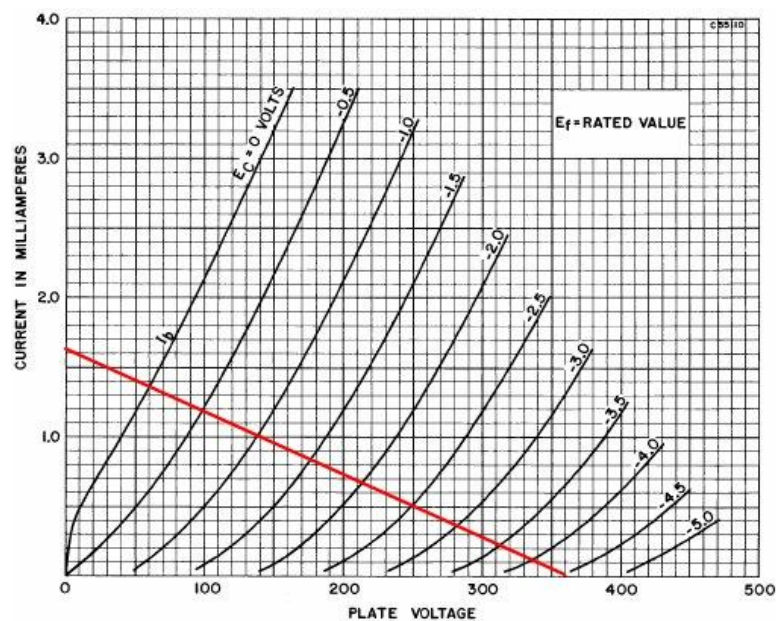


Рисунок 2: Построение нагрузочной прямой по постоянному току.

Если напряжение на сетке будет $-1B$, то анодный ток, проходящий через катодный резистор $1.8k\Omega$, составит

$$\frac{1B}{1.8k\Omega} = 0.56mA.$$

При сеточных напряжениях $-1.5V$ и $-2V$ анодные токи составят $0.83mA$ и $1.1mA$ соответственно. Эти точки задают линию нагрузки сетки, которая пересекает линию нагрузки по постоянному току в точке, соответствующей смещению $-1.5V$ (рисунок 3).

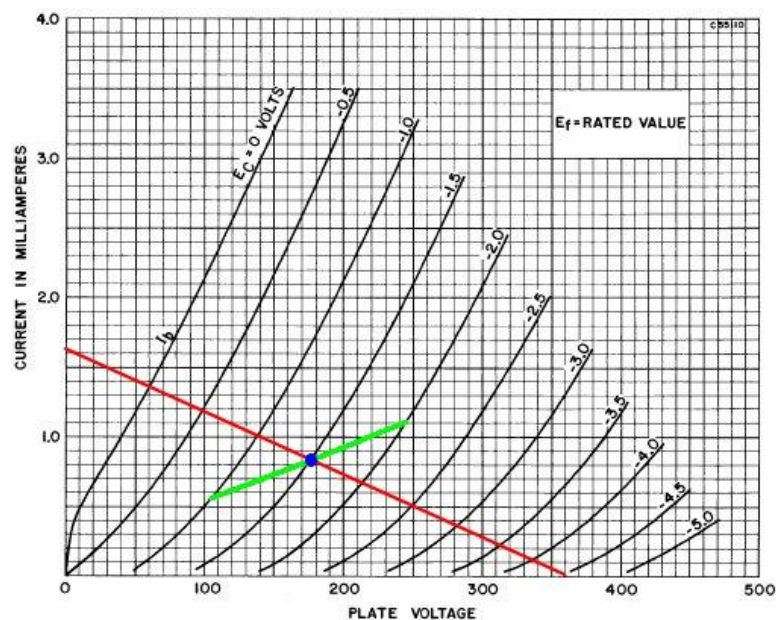


Рисунок 3: Построение линии нагрузки сетки и определение напряжения смещения.

1.2. Усиление и искажения.

Из рисунка 1 видно, что по высоким частотам резистор 470кОм шунтирован конденсатором, и нагрузкой по переменному току для этих частот, является параллельное соединение анодного резистора 220кОм и резистора 500кОм, что в итоге дает эффективное сопротивление 154кОм. В этом случае падение анодного напряжения от 175В (значение при постоянном токе) до нуля увеличит ток на

$$\frac{175B}{154k\Omega} = 1.1mA.$$

Таким образом, текущее постоянное значение 0.83мА повышается до 1.93мА. Эта линия изображена синим цветом на рисунке 4. (На более низких частотах линии нагрузки по переменному току располагаются уже ближе к линии нагрузки по постоянному току).

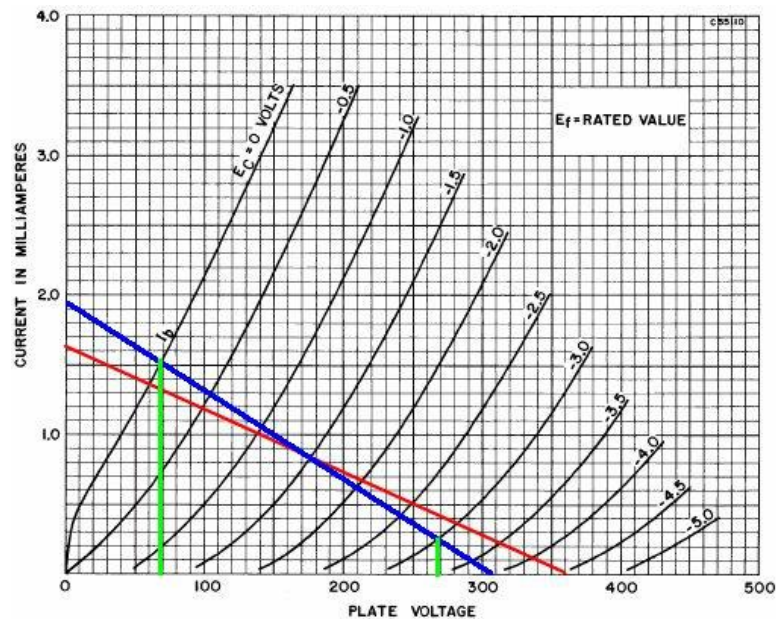


Рисунок 4: Построение линий нагрузки по переменному току

Входной сигнал с амплитудой 1.5В даёт разброс по постоянному напряжению на аноде от 68В до 268В (зелёные линии на рисунке 4). Следовательно, коэффициент усиления напряжению будет

$$\frac{268B - 68B}{3B} = 67.$$

Коэффициент усиления при высоком уровне входного сигнала немного меньше, чем при низком, из-за сжатия сеточных линий при смещении близком к -3В. Линии сетки становятся ближе друг к другу, так как колебания анодного напряжения уменьшаются. Это сжатие создаёт гармонические искажения второго порядка, которые увеличиваются, когда амплитуда сигнала приближается к 1.5В. За пределом 1.5В триод входит в насыщение на положительной полуволне входного сигнала. Когда сеточные колебания по амплитуде выходят за 2.5В, напряжение на сетке, колеблясь, попадает в зону ниже -4В, что заставляет лампу входить в отсечку.

Таким образом, когда амплитуда входного сигнала приближается к 1.5В, искажения характеризуются неуклонным ростом числа гармоник 2-го порядка, далее следует быстрый рост искажений вторых гармоник, когда амплитуда увеличивается с 1.5В до 2.5В, и рост искажений тяжёлых третьих гармоник при более высоких уровнях сигнала. В конечном счёте, входной

синусоидальный сигнал, когда его уровень очень высок, создаёт выходной сигнал уже почти прямоугольной формы.

Для достижения более высокого усиления регулятор громкости на гитаре устанавливают на максимум, а громкость усилителя на минимум, и тогда этот каскад загоняется в режим Overdrive, сохраняя при этом последующие каскады чистыми (без ограничения). В типовом включении, однако, триод работает значительно ниже пределов его колебаний, создавая существенный коэффициент усиления, но при этом скромную долю вторых гармоник. Поэтому возникает желание добавить яркости. Для этого во входном каскаде и вводится Bright boost.

1.3. Входной каскад.

Первый каскад канала Overdrive использует классическую обвязку сетки на входе (рисунок 5 он же рисунок 1).

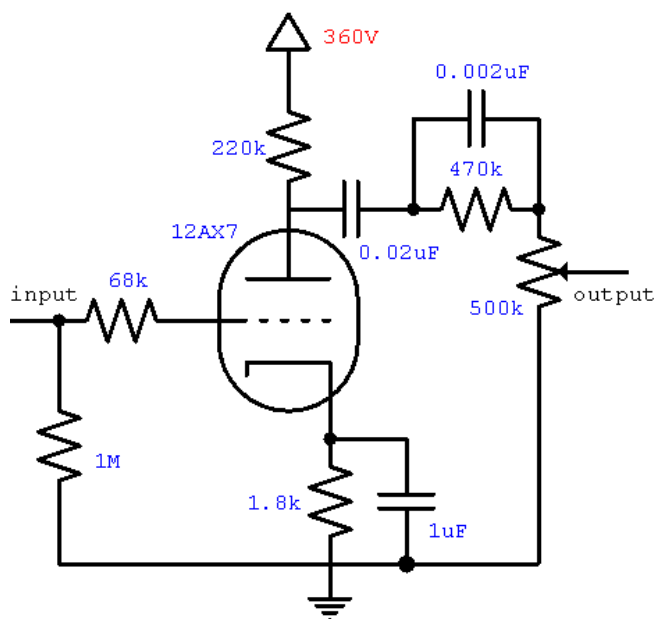


Рисунок 5 (1): Схема первого каскада предусилителя Soldano SLO-100

Если предположить, что коэффициент усиления по напряжению составит 74, а входная сеточная ёмкость составит 1.7пФ, то это даст срез -3дБ высоких частот, находящихся около 18кГц. Существует определенный спектр частот, который нужен для гитарного усиления. Таким образом, можно сказать, что амплитуда на входном гнезде и на сетке по всем частотам совпадают и составляют 1.5В. При этом радио частоты эффективно подавляются.

1.4. Усиления яркости (Bright Boost).

Маленький коэффициент усиления сигнала по напряжению возрастает от 51 на частоте 82Гц до 74 на частоте 400Гц из-за относительно небольшой емкости блокировочного катодного конденсатора 1мкФ. В верхней части этого диапазона входное сопротивление 49кОм. Это соответствует суммарному сопротивлению двух нагрузок, включённых параллельно: нагрузки после анода и внутреннего сопротивления самой лампы. При нагрузке в диапазоне от 500кОм до 970кОм в зависимости от частоты создаётся потеря в 1дБ или менее из-за воздействия межкаскадного конденсатора емкостью 0.02мкФ.

Конденсатор 0.002мкФ в выходной цепи обеспечивает импульс яркости на более высоких частотах, шунтируя резистор 470кОм. При положении регулятора громкости на гитаре на максимуме входная лампа 12AX7 ослабляет усиление на 6дБ в районе 82Гц и только на 1дБ на частоте 1кГц (при этом предполагается, что повышение bright boost обусловлено постоянным выходным сопротивлением 49кОм, что является разумным значением для высоких частот в случае полного шунтирования катодным конденсатором).

Первый каскад Soldano, безусловно, окрашивает сигнал. Давайте теперь рассмотрим следующий каскад.

2. Второй каскад.

2.1. Условия по постоянному напряжению.

Второй каскад преампа (рисунок 6) выполнен на триоде 12AX7 и имеет сеточный блокиратор гораздо большего значения.

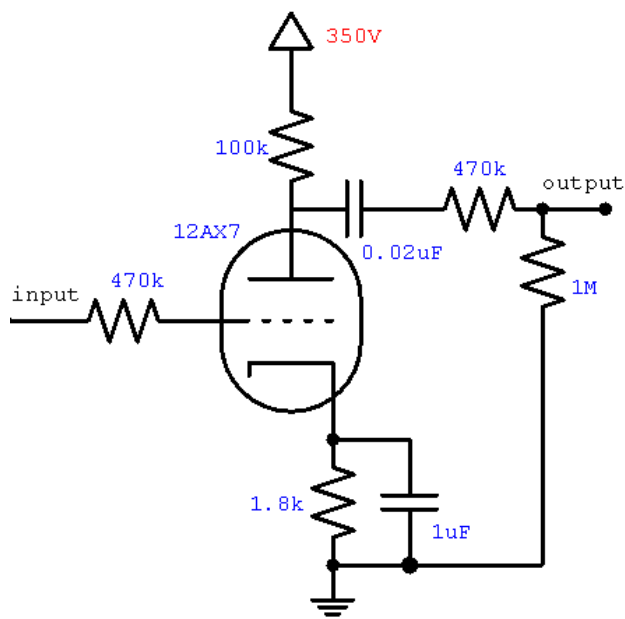


Рисунок 6: Схема второго каскада предусилителя Soldano SLO-100

Линия нагрузки по постоянному току одним концом лежит на оси напряжений в точке 350В, а вторым на оси токов в точке

$$\frac{350V}{100k\Omega + 1.8k\Omega} = 3.4mA.$$

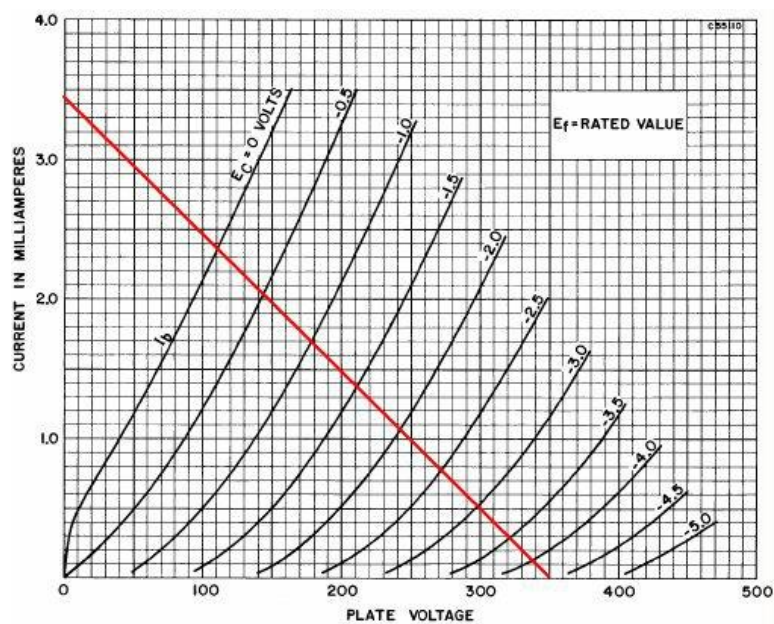


Рисунок 7: Построение нагрузочной прямой по постоянному току.

При напряжении на сетке -1.5В анодный ток, проходящий через катодный резистор 1.8кОм, составит

$$\frac{1.5B}{1.8k\Omega} = 0.83mA.$$

При напряжении на сетке -2В и -2.5В ток будет 1.1мА и 1.4мА соответственно. В результате получается точка пересечения, лежащая на кривой -2В (рисунок 8).

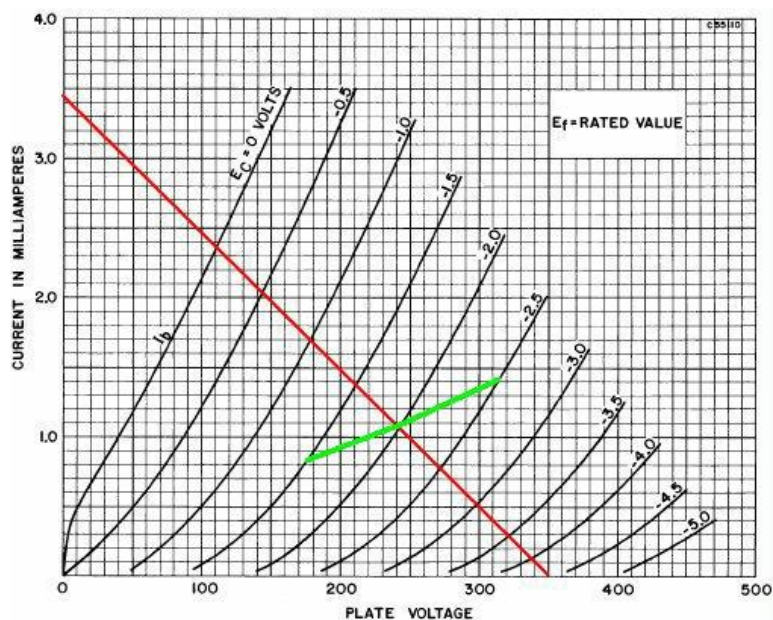


Рисунок 8: Построение линии нагрузки сетки и определение напряжения смещения.

2.2. Усиление и искажения.

Полезная нагрузка для высоких частот, на которых катод является полностью зашунтированным, составит 1.47МОм в выходной цепи. В этом случае падение напряжения на аноде от постоянной выставленной величины 240В до нуля создаст увеличение тока

$$\frac{240B}{94k\Omega} = 2.55mA.$$

То есть, существующее значение, таким образом, повышается от 1.1мА (значение для линии нагрузки по постоянному току) до 3.65мА (верхняя точка на оси тока). Эта линия изображена на рисунке 9 синим цветом.

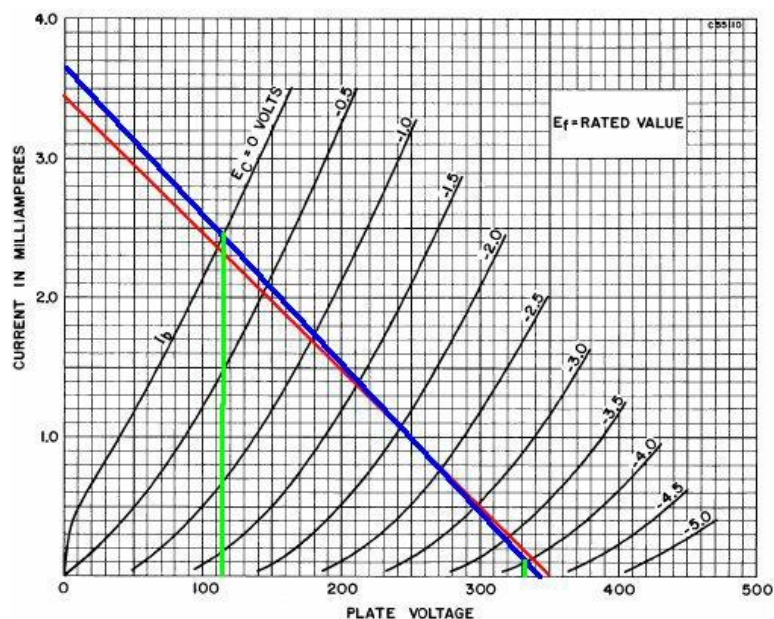


Рисунок 9: Построение линий нагрузки по переменному току

Обратите внимание, что линия нагрузки по переменному току на этом каскаде располагается гораздо ближе к линии нагрузки по постоянному току, чем в предыдущем. Причина в том, что первый каскад имеет анодный резистор 220кОм, который создаёт большее выходное сопротивление. Также он имеет параллельную нагрузку 500кОм, которая будет провоцировать большее потребление тока, чем нагрузка второго каскада 1.47МОм.

Напряжение на сетке меняется от 0 до -4В, вызывая изменение напряжения на аноде от 115В до 332В. Коэффициент усиления в этом диапазоне составит $(322-115)/4=54$

$$\frac{322B - 115B}{4B} = 54.$$

По сравнению с первым каскадом точка смещения по постоянному току здесь ближе к середине линий нагрузки. Это и позволяет сеточному напряжению колебаться в пределах 4В, что приводит к насыщению и ограничению почти одновременно. Следовательно, итоговые искажения характеризуются ростом искажений вторых гармоник по мере приближения амплитуды сигнала к 2В, а затем быстро растёт доля искажений третьих гармоник при дальнейшем повышении уровня сигнала. В конечном счёте, синусоидальный сигнал становится прямоугольным при максимальной перегрузке.

2.3. Входная чувствительность.

Коэффициент усиления первого каскада на высоких частотах составляет около 74. При положении регулятора громкости на максимум первый контур входного каскада имеет коэффициент усиления около 0.5, что создаёт общее усиление в этом каскаде

$$0.5 \cdot 67 = 34.$$

Таким образом, амплитуда сигнала, поступающего на вход усилителя, для нормальной работы второго каскада секции Overdrive должна составлять

$$\frac{2B}{34} = 59 мВ .$$

Это, безусловно, вполне достижимо даже при использовании датчиков с низким усилением. Но давайте не будем подробно анализировать этот момент, так как легендарный звук Soldano заключается не только в этом.

2.4. Частотный отклик.

Меленький коэффициент усиления по напряжению сигнала возрастает с 35 на частоте 82Гц до 55 на 400Гц из-за относительно небольшого блокировочного катодного конденсатора. Максимальное усиление на высоких частотах 60. Конденсатор 0.02мкФ эффективно пропускает все гитарные частоты. Делитель напряжения, образованный резисторами 470кОм и 1МОм на выходе лампы, ослабляет сигнал с коэффициентом 0.68 (3.3дБ).

2.5. Перегрузка (Overdrive).

Резистор 470кОм суммируется с выходным сопротивлением первого каскада, которое составляет 100кОм. Со стороны второго каскада эффективное выходное сопротивление первого каскада увеличивается примерно на 500кОм, то есть во много раз выше, чем в обычном каскаде на 12AX7.

Высокое выходное сопротивление приводит к появлению эффекта Миллера в ёмкости второго триода. Чтобы усилить этот эффект, достаточно значительно ослабить сигналы высокой частоты на гитаре. Ослабление на сеточном блокираторе сигнала 4кГц, например, составит от 4дБ до 6дБв зависимости от настройки громкости. Эта реакция компенсирует существенный подъём высоких частот, созданный первым каскадом.

Перегрузка с высоким выходным сопротивлением становится явным преимуществом. Это гарантирует то, что первый каскад не сможет сделать сетку второго каскада положительной даже при значительном уровне сигнала и не сможет повлиять на сеточный ток. Первый каскад всегда «видит» нагрузку 470кОм не зависимо от того, что происходит на втором триоде. Это значительно уменьшает скачки смещения, которые могут привести к блокировочным искажениям.

Большие блокировочные резисторы часто используются в Hi-Gain усилителях в качестве регуляторов Master Volume в предусилителе, но отсутствуют в конструкциях классических усилителей, в которых перегруз основан на подгрузке оконечника (усилителя мощности). Например, в Fender Bassman 5F6-A выходные лампы перегружаются задолго до того, как будут перегружены лампы предусилителя. Следовательно, скачки смещения не являются проблемой. Усиление Bright boost, компенсирующее большие значения сеточных блокираторов, так же не требуется в традиционных схемах усилителей.

3. Третий каскад.

3.1. Условия по постоянному напряжению.

В третьем каскаде используется триод 12AX7, который находится вместе с триодом второго каскада в корпусе одной лампы (рисунок 10).

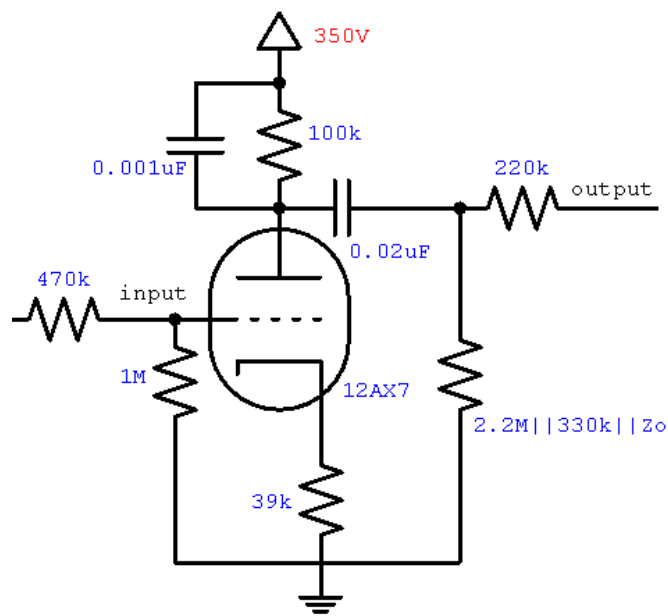


Рисунок 10: Схема третьего каскада предусилителя Soldano SLO-100

Нагрузка по переменному току состоит из резистора 2.2МОм, соединенного параллельно с резистором 330кОм и выходным сопротивлением Z_o второго каскада канала «Normal» усилителя. Его схема показана на рисунке 11.

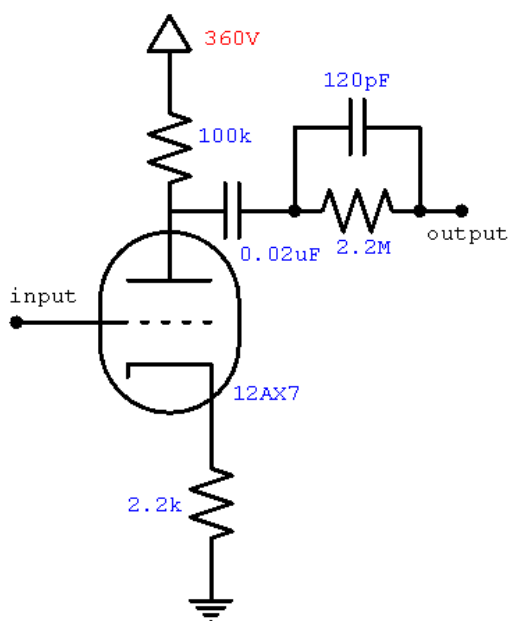


Рисунок 11: Схема второго каскада канала «Normal»

Для звуковых частот его выходное сопротивление составляет 74кОм плюс сопротивление от конденсатора 120пФ, стоящего параллельно резистору 2.2МОм. Если пренебречь этим маленьким конденсатором, то нагрузка для канала «Overdrive» при среднем уровне сигнала составит

$$\frac{2.2MO_{\Omega} \cdot 330kO_{\Omega} \cdot (2.2MO_{\Omega} + 74kO_{\Omega})}{2.2MO_{\Omega} \cdot 330kO_{\Omega} + 2.2MO_{\Omega} \cdot (2.2MO_{\Omega} + 74kO_{\Omega}) + 330kO_{\Omega} \cdot (2.2MO_{\Omega} + 74kO_{\Omega})} = 255kO_{\Omega}$$

Это значение будем использовать как эффективную выходную нагрузку, когда будем строить линии нагрузки по переменному току.

Линия нагрузки по постоянному току (рисунок 12) одним концом лежит на оси напряжений в точке 350В, а другим на оси токов в точке

$$\frac{350V}{100kO_{\Omega} + 39kO_{\Omega}} = 2.5mA.$$

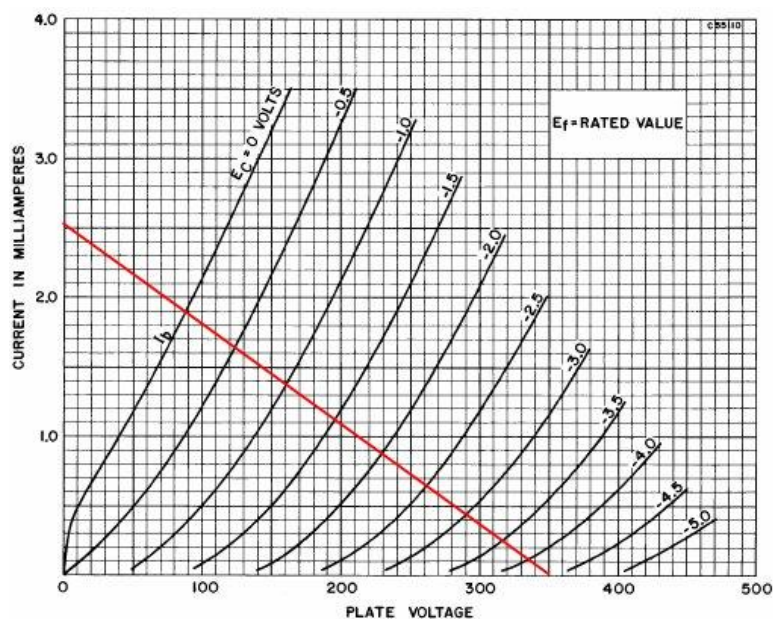


Рисунок 12: Построение линии нагрузки по постоянному току

Сеточное напряжение изменяется от -3.5В до -4.5В. Ток, проходящий через катодный резистор 39кОм, возрастает с 0.09мА до 1.1мА. Это показано зелёной линией на рисунке 13.

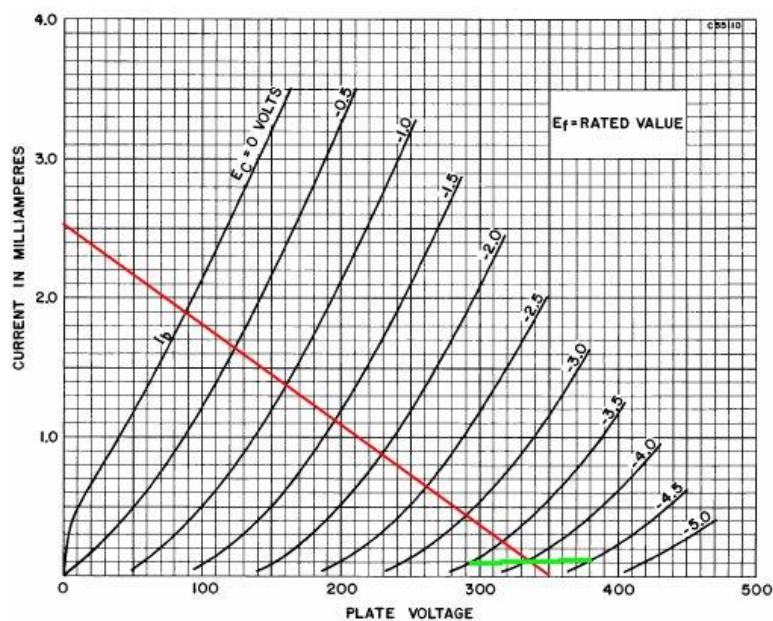


Рисунок 13: Построение линии нагрузки сетки и определение напряжения смещения.

Смещение триода, таким образом, взято очень близко к сеточному ограничению - около -4В. Такая ситуация может показаться опасной, но довольно большой резистор 39кОм в катode создаёт существенную отрицательную обратную связь, чтобы противостоять изменениям сеточного напряжения, вызванным входным сигналом. Мы разберемся, почему этот каскад не так близок к ограничению, как это кажется, а затем изучим эффекты искажения, появляющиеся в этой области кривых.

3.2. Динамический потенциал.

Третий каскад имеет конденсатор 0.001мкФ (1нФ), шунтирующий анодный резистор, для предотвращения паразитных высокочастотных колебаний. Он служит той же цели, что и конденсатор 47пФ между анодами фазоинвертора, как, например, в схеме Fender Bassman. Однако, тут его значение намного больше, что создаёт значительное ослабление высоких частот.

Для высоких частот конденсатор 0.001мкФ полностью шунтирует анодный резистор, и усиление будет нулевым. Для низких частот конденсатор открыт, и коэффициент усиления составит где-то 1.8 (5дБ), обеспечивая значительное усиление низких частот. Но это небольшой коэффициент усиления по сравнению с другими каскадами. Для звуковых (аудио) сигналов конденсатор стоит параллельно с входным сопротивлением 98кОм и эффективной нагрузкой 255кОм (как описано выше). Это даёт срез -3дБ по высоким частотам от 2.2кГц.

При выкручивании регулятора Gain усиление резко сокращается, так как не шунтированный катодный резистор создаёт существенную отрицательную обратную связь. Это заставляет катод «следить» за сеткой. (Но это не катодный повторитель, поскольку выходной сигнал берётся с анода, а не с катода) Таким образом, напряжение сетка-катод, которое было найдено из сеточных кривых, значительно меньше, чем напряжение сетка-земля, которое представляет собой входной сигнал.

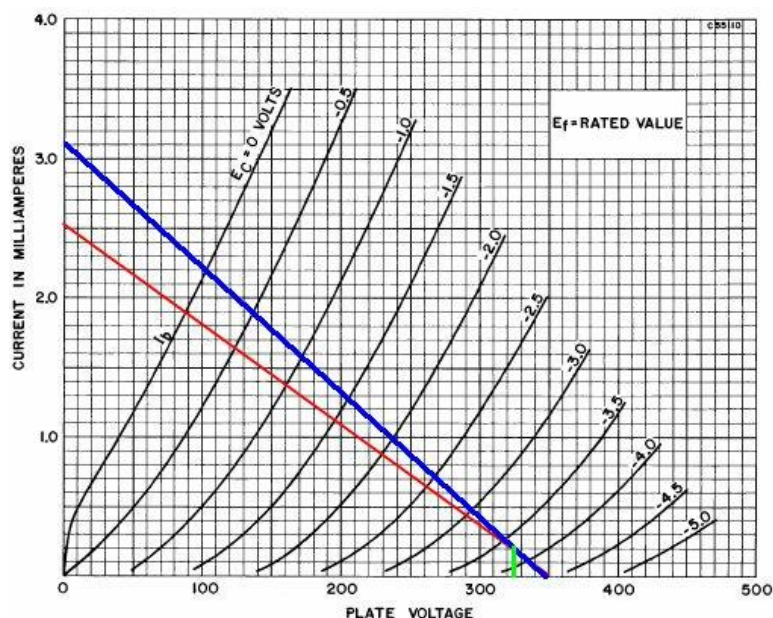


Рисунок 14: Построение линий нагрузки по переменному току

Для низких и средних частот сопротивление цепи составит

$$39kO_M + \frac{100kO_M \cdot 255kO_M}{100kO_M + 255kO_M} = 111kO_M$$

Это означает, что падение анодного напряжения от 335В (значение по постоянному току) к нулю вольт создаёт увеличение тока

$$\frac{335B}{111k\Omega} = 3mA.$$

То есть ток повышается с 0.1мА до 3.1мА, что отмечено верхней синей линией на графике рисунка 14.

Сеточное напряжение меняется около $\pm 0.3B$ относительно выставленного смещения по постоянному току -4В, что не вызывает ограничения сигнала лампой. Соответственно анодный ток будет меняться в пределах $\pm 0.1mA$, что создаёт изменение напряжения на катодном резисторе

$$\pm (0.1mA \cdot 39k\Omega) = \pm 3.9B.$$

Из этого следует, что на входе необходим сигнал

$$\pm (3.9B + 0.3B) = \pm 4.2B$$

Таким образом, на этом каскаде существует большой запас (выше чем на предыдущих каскадах), несмотря на точку смещения, находящуюся чуть выше ограничения.

На первом каскаде коэффициент усиления составил 34, на втором 60 и 0,68 на его выходе. Тогда величина сигнала с входного гнезда, который будет перегружать третий каскад, составит:

$$4.2B \cdot \frac{1}{34} \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{1}{0.68} = 3mB$$

То есть очень легко создать перегрузку, даже если гитара со «слабыми» звукоснимателями, и регулятор громкости на гитаре находится в максимальном положении. Даже слабый удар по струнам создаст перегруз на этом каскаде. При обычных настройках громкости предусилитель входит в режим Overdrive задолго до этого каскада.

3.3. Distortion и Overdrive.

Работа этого каскада близка к ограничению и далека от насыщения гармоническими искажениями и динамики быстрого перехода в Overdrive, потому что отрицательные колебания сигнала ограничиваются (срезаются) задолго до этого каскада, в отличие от положительных. То есть форма выходного сигнала несимметрична, что, прежде всего, создает гармонические искажения второго порядка. Расположение точки смещения ближе к центру нагрузочной линии может вызвать ограничение как у положительных, так и у отрицательных полуволн сигнала, создавая, главным образом, гармонические искажения третьего порядка.

Точка смещения расположена близко к области насыщения, и это создаёт гармонические искажения второго порядка. Однако динамика уже совсем другая. Из-за высокого выходного сопротивления предыдущего каскада (которое становится ещё выше из-за применения резистора 470кОм в качестве сеточного блокиратора) ограничение положительной полуволны сигнала очень выражено и происходит довольно быстро. Сетка колеблется к нулю вольт в наиболее линейном диапазоне, а затем сразу останавливается, отказываясь уходить в зону положительных напряжений. С другой стороны, в отсечке лампа работает в линейном диапазоне. Частично лампа находится в отсечке, создавая при этом компрессию, которая постепенно уменьшает усиление,

пока, в конечном счёте, анодный ток не достигнет нуля. Таким образом, на третьем каскаде Soldano происходит наиболее мягкий переход в Overdrive.

Можно сказать, что по мере увеличения уровня сигнала доля гармонических искажений второго порядка постепенно возрастает, задавая более тяжёлый Overdrive. Входная чувствительность довольно низкая по сравнению с традиционным включением триода, таким образом, эффект Overdrive легко достигается. Однако, усиление сигнала в Soldano SLO на этом не заканчивается: это ещё не всё усиление и перегруз этого усилителя. Давайте теперь рассмотрим четвёртый каскад.

4. Четвёртый каскад.

4.1. Условия по постоянному напряжению.

Четвёртый каскад представляет собой усиливающий каскад, объединённый с катодным повторителем (рисунок 15). В аноде стоит резистор 220кОм, он же соединён и с сеткой повторителя. Он служит той же цели что и резистор 470кОм на входе второго каскада – минимизирует скачки смещения, чтобы снизить вероятность блокировочных искажений. Меньшее значение этого сопротивления и более высокий коэффициент усиления по напряжению создают ослабление на 3.6дБ на частоте 4кГц, поэтому ослабление по высоким частотам тут меньше чем на входе второго каскада предусилителя.

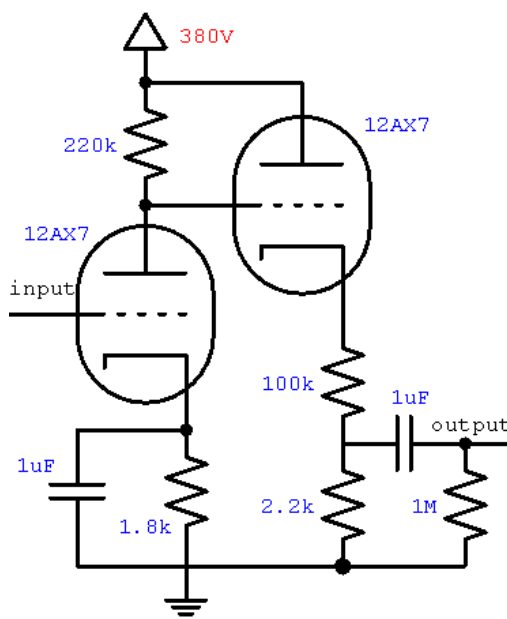


Рисунок 15: Схема четвертого каскада предусилителя Soldano SLO-100

Первый (усиливающий) триод имеет такую же «обвязку» как первый (входной) триод усилителя. Маленький коэффициент усиления по напряжению сигнала возрастает с 51 на 82Гц до 74 на 400Гц в связи с относительно небольшим конденсатором 1мкФ, шунтирующим катодный резистор. Коэффициент усиления катодного повторителя примерно равен единице. На его выходе сигнал проходит через делитель напряжения с ослаблением

$$\frac{2.2\text{кОм}}{100\text{кОм} + 2.2\text{кОм}} = 0.02,$$

что составляет 34дБ затухания. Также существуют едва заметные потери звука на делителе, образованном конденсатором 1мкФ и резистором утечки сетки следующего каскада 1МОм. Чистое усиление от этих двух триодов для 82 Гц составит таким образом

$$51 \cdot 0.02 = 1$$

и

$$74 \cdot 0.02 = 1.5$$

при 400 Гц.

Линия нагрузки для катодного повторителя одним концом лежит на оси напряжений в точке 380В, а вторым на оси токов в точке

$$\frac{380B}{100k\Omega + 2.2k\Omega} = 3.7mA.$$

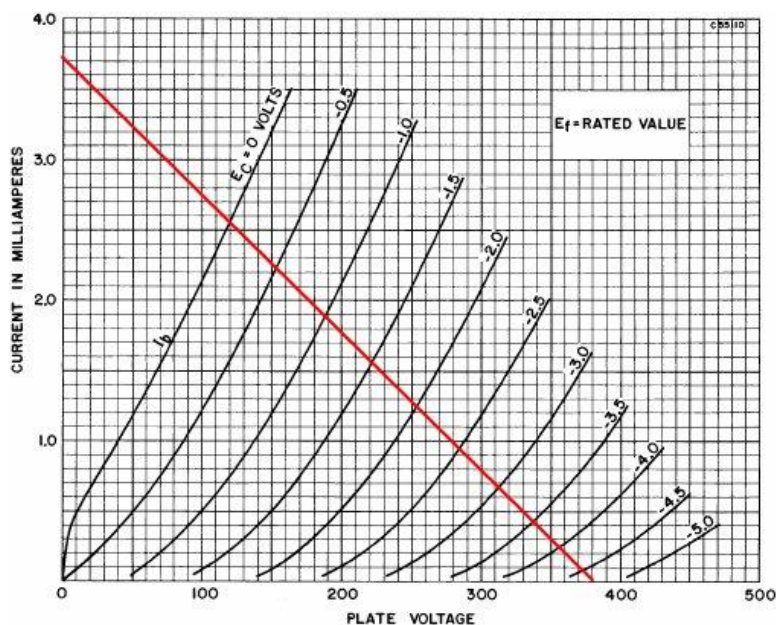


Рисунок 16: Построение линии нагрузки по постоянному току

Напряжение сетки относительно земли будет равно 380В минус падение напряжения на резисторе 220кОм. Из нашего анализа первого каскада известно, что ток был 0.83мА. Тогда падение напряжения составит:

$$220k\Omega \cdot 0.83mA = 183B.$$

Таким образом, напряжение между сеткой и землёй будет

$$380B - 183B = 197B.$$

Если напряжение сетка-катод равно нулю, то ток, текущий через катодные резисторы 2.2кОм и 10кОм0 составит

$$\frac{197B}{102k\Omega} = 1.95mA.$$

Точка, в которой линия нагрузки по постоянному току пересекает сеточные кривые, показана на графике (рисунок 17) (точка пересечения с зелёной линией).

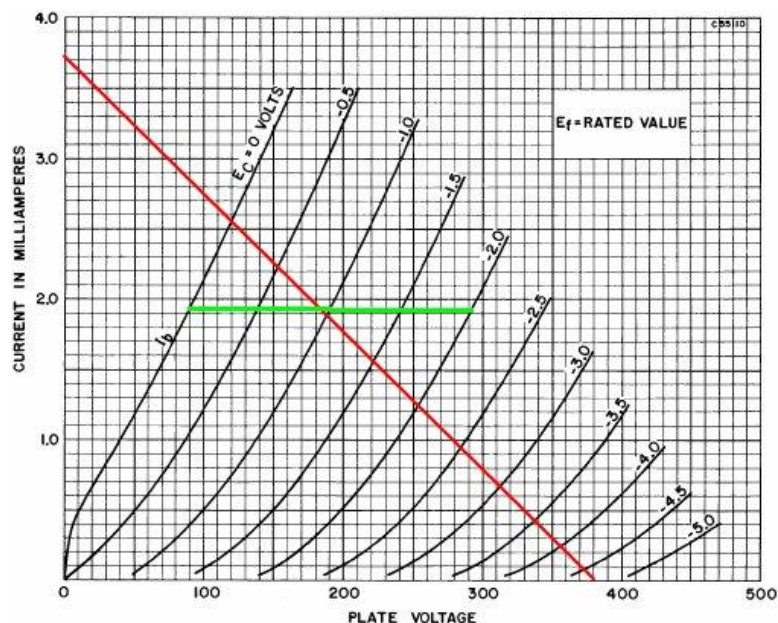


Рисунок 17: Построение линии нагрузки сетки и определение напряжения смещения.

4.2. Динамический потенциал.

Усиливающий каскад напрямую связан с катодным повторителем (связь по постоянному току), который имеет очень высокое входное сопротивление. Резистор 1.8кОм в катode усиливающего каскада достаточно мал, поэтому линия нагрузки по переменному току почти полностью совпадает с линией нагрузки по постоянному току. Изучив линию нагрузки по постоянному току и точки смещения на первом (усиливающем) каскаде, мы получаем размах анодного напряжения от 55В до 297В (рисунок 18).

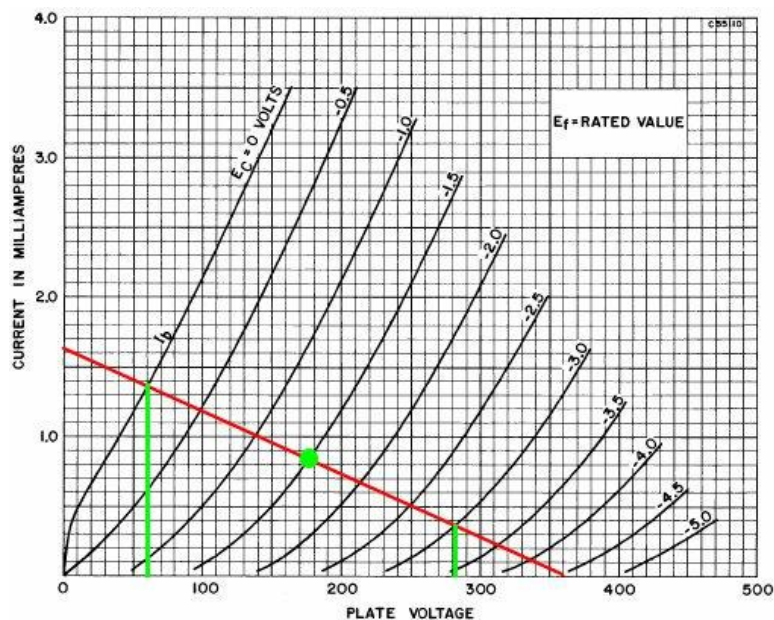


Рисунок 18: Построение линии нагрузки по переменному току

Тогда наибольший коэффициент усиления (на первом каскаде этой связки) составит:

$$\frac{297 - 55}{3} = 81.$$

Исходя из линии нагрузки катодного повторителя, положительная полуволна входного сигнала меняет сеточное напряжение до нуля и создаёт в этом случае анодный ток 2.6мА. Это даст на катоде

$$2.6mA \cdot 102.2k\Omega = 266V.$$

Таким образом, напряжение сетка-земля составит 266В, и анодный ток, который потечёт через резистор 220кОм, составит

$$\frac{380V - 266V}{220k\Omega} = 0.5mA.$$

Усиливающий триод, таким образом, находится значительно выше частоты среза. Катодный повторитель достигает ограничения до того, как его достигнет усиливающий триод.

У второго элемента пары, усиливающего триода, анодный ток стремится к 1.4мА, когда сетка становится положительнее, смещаясь к нулю вольт. Тогда

$$1.4mA \cdot 220k\Omega = 308V$$

упадёт на анодном резисторе, так что напряжение между сеткой и землёй на катодном повторителе составит

$$380V - 308V = 72V.$$

Чтобы катодный повторитель ограничивал сигнал, его напряжение сетка-катод должно быть около -5В, а напряжение катод-земля будет нулём в этой системе, потому что ток в этом случае не течёт. Это даёт теоретическое напряжение на усиливающем триоде -5В, что является невозможным. Так что пульсации сигнала на усиливающем триоде достигают своего предела в первую очередь в этом направлении.

Без катодного повторителя будет серьёзная отсечка напряжения на сетке усиливающего триода, при стремлении к нулю эта постепенная отсечка переходит в ограничение. Непосредственная связь катодного повторителя и усиливающего триода выравнивает это. Таким образом, четвёртый каскад Soldano даёт более симметричный выходной сигнал. Доля вторых гармоник уменьшается, доля третьих увеличивается.

В итоге усиление на первом каскаде 34, на втором 60 и 0.68 в цепочке после него, 1.8 усиление на третьем каскаде. Тогда требуемая амплитуда сигнала со входного гнезда усилителя для получения перегрузки (Overdrive) на четвёртом каскаде будет меньше чем:

$$1.5V \cdot \frac{1}{34} \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{1}{0.68} \cdot \frac{1}{1.8} = 600\mu V.$$

Это намного ниже, чем в более старых (традиционных) конструкциях гитарных усилителей, поэтому необходим сигнал очень низкого уровня для перегрузки 4-го каскада предусилителя.

4.3. Искажения (Distortion).

Один из наиболее важных аспектов разработки усилителей для перегрузки (Hi Gain) непосредственно связан с катодным повторителем, который влияет на ограничение выходного сигнала. Перегруженный катодный повторитель при положительной полуволне вызывает падение анодно-катодного напряжения, что делает сетку более привлекательной для электронов. В результате увеличивается сеточный ток, что приводит к увеличению тока через анодный резистор усиливающего триода, лимитируя этим снижение напряжения на нём. Таким образом, коэффициент усиления усиливающего триода уменьшается, и положительные пики входного сигнала при применении катодного повторителя более сглажены.

Так как усиливающий триод подходит к отсечке, входное сопротивление катодного повторителя падает с его обычного очень высокого значения, представляя лёгкую нагрузку, до очень низкого значения, что изменяет расклад в существующей схеме. Это обостряет отсечку сигнала и делает его более симметричным отсечке в противоположном направлении. Как отмечает Rutt (*T.E. Rutt, "Vacuum Tube Triode Nonlinearity as Part of The Electric Guitar Sound," 76th Convention of the Audio Engineering Society, New York, 1984.*), этому явлению нет эквивалента в транзисторных схемах.

Давайте теперь изучим заключительный каскад канала Overdrive в Soldano SLO 100.

5. Пятый каскад.

5.1. Условия по постоянному напряжению.

Пятый каскад практически идентичен четвёртому (рисунок 19). Он создаёт коэффициент усиления по напряжению 43 (33дБ). Оба эти каскада заканчиваются катодными повторителями, которые обеспечивают низкое выходное сопротивление для управления относительно большими нагрузками. Четвёртый этап дополнительно служит для создания петель эффектов, а пятый нагружен на темброблок от Fender Bassman 5F6-A, но с некоторыми изменениями в номиналах.

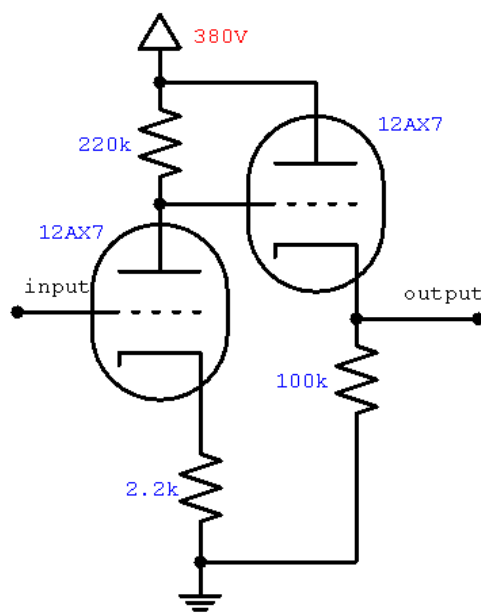


Рисунок 19: Схема пятого каскада предусилителя Soldano SLO-100

Линия нагрузки по постоянному току одним концом лежит на оси напряжений в точке 380В, а вторым на оси током в точке

$$\frac{380V}{220k\Omega + 2.2k\Omega} = 1.7mA.$$

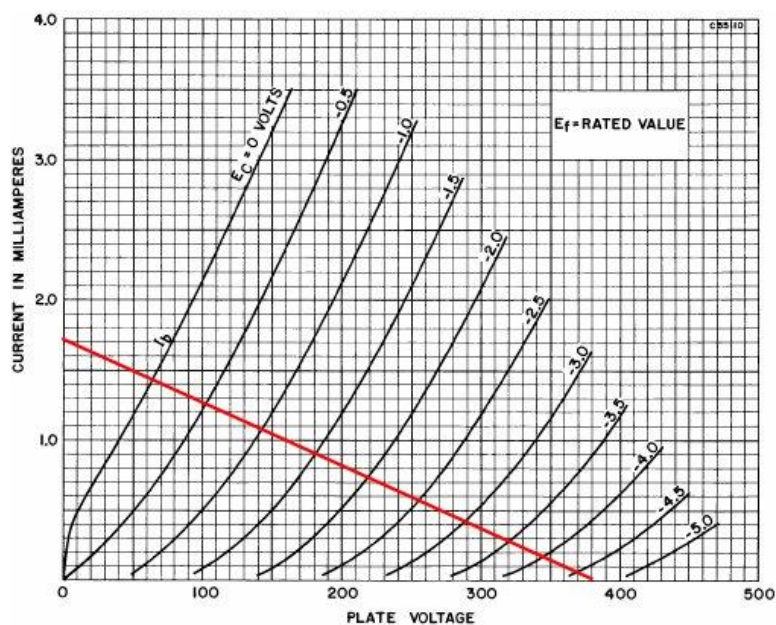


Рисунок 20: Построение линии нагрузки по постоянному току

Если напряжение на сетке будет -1В, то анодный ток, проходящий через катодный резистор 2.2кОм, будет

$$\frac{1В}{2.2кОм} = 0.45мА.$$

При сеточном напряжении -1.5В и -2В анодный ток будет 0.68мА и 0.91мА соответственно. По этим точкам строится сеточная линия, которая будет пересекать нагрузочную прямую в точке -1.75В (рисунок 21).

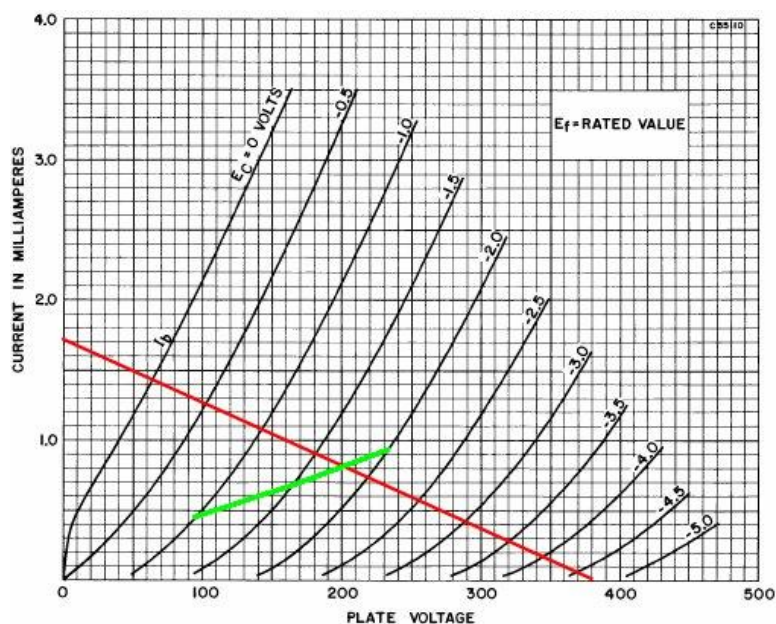


Рисунок 21: Построение линии нагрузки сетки и определение напряжения смещения.

Поскольку катодный повторитель имеет очень высокое входное сопротивление, линии нагрузки по переменному и постоянному току практически идентичны. На основании полученной рабочей точки 1.75В следует вывод, что изменение напряжения на сетке вводит лампу в насыщение. Это будет около 2.75В для получения отсечки (рисунок 22).

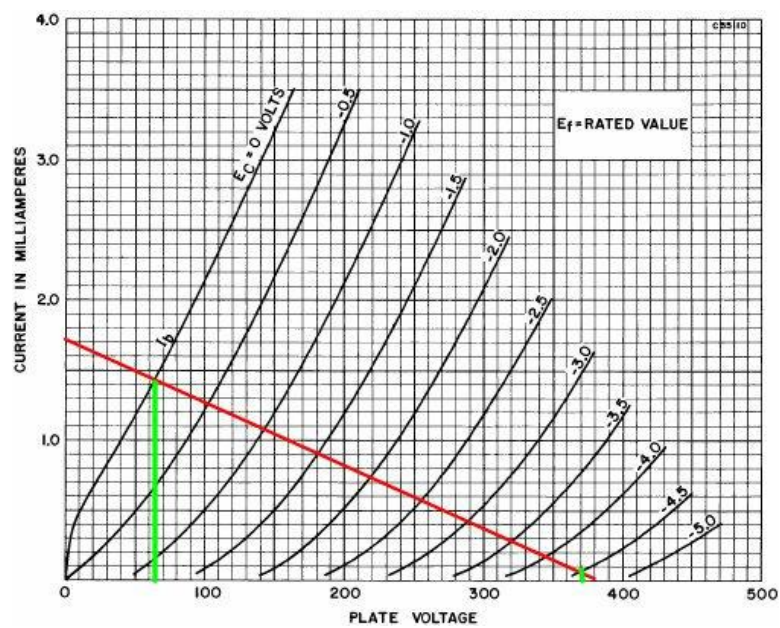


Рисунок 22: Построение линии нагрузки по переменному току

5.2. Искажения (Distortion).

Если напряжение на сетке изменяется от своего выставленного смещения -1.75В до нуля, то анодный ток увеличивается с 0.8мА до 1.43мА. Ток, текущий через резистор 2.2кОм в катод, таким образом, увеличится на

$$1.43\text{мА} - 0.8\text{мА} = 0.63\text{мА}.$$

Из-за этого возникает катодное напряжение

$$0.63\text{мА} \cdot 2.2\text{кОм} = 1.4\text{В}.$$

Поэтому амплитуда входного сигнала, измеренная между сеткой и землей, на этом каскаде составит

$$1.4\text{В} + 1.75\text{В} = 3.15\text{В}.$$

В конечном итоге имеем: усиление на первом каскаде 34, на втором 60 и 0.68 в цепочке после него, 1.8 - усиление на третьем каскаде и 1.5 - усиление на четвёртом каскаде. Тогда амплитуда сигнала на входе усилителя, необходимая для приведения пятого каскада в перегрузку (при положении регулятора громкости на максимум) составит:

$$3.15\text{В} \cdot \frac{1}{34} \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{1}{0.68} \cdot \frac{1}{1.8} \cdot \frac{1}{1.5} = 840\text{мкВ}.$$

Это, по крайней мере, на 40% больше, чем на четвёртом каскаде, так как у пятого каскада остаётся запас даже в самых жестких условиях перегрузки. Четвёртый каскад стоит перед посылом на петлю (Send) и производит уменьшение уровня сигнала с его последующим восстановлением на пятом каскаде.

Усиливающий каскад имеет коэффициент усиления 44. Это около половины возможного усиления, которое может быть достигнуто при использовании большого номинала конденсатора, шунтирующего катодный резистор. Катодный повторитель имеет усиление около единицы. Таким образом, усиление на пятом каскаде составит около 44 (33дБ), что более чем компенсирует ослабление от включённого после него темброблока.

Рассмотрев каждый каскад в отдельности, давайте посмотрим на канал Overdrive предусилителя Soldano Super Lead Overdrive как общую систему и подведём некоторые итоги.

6. Извлечённые уроки. Разработка Hi Gain преампа.

Основываясь на анализе канала Overdrive усилителя Soldano SLO, давайте рассмотрим, какие выводы можно сделать относительно стратегии Soldano в разработке HiGain предусилителей.

6.1. Создание темброблока перед регулятором Master Volume.

Темброблок Soldano Super Lead Overdrive и регулятор громкости последовательно с ним представлен на рисунке 23.

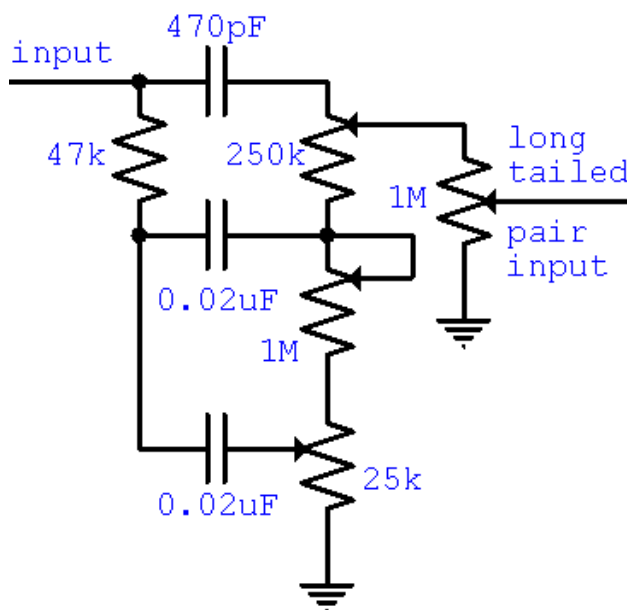


Рисунок 23: Схема темброблока предусилителя Soldano SLO 100

Управление темброблоком также ослабляет и выходной сигнал предусилителя, в результате чего динамика искажений очень избирательна по частоте. Если бы темброблок был расположен выше по схеме и отдалён от регулятора громкости на один или два каскада усиления, результат был бы совсем другим.

6.2. Размещение регулятора Master Volume перед фазоинвертором.

Солдановский темброблок и управление громкостью овердрайва находятся между последним каскадом преампа и фазоинвертором, поэтому фазоинвертор всегда имеет достаточный запас для управления усилителем мощности. За исключением крайних случаев, когда перегрузка (Overdrive) создаётся предусилителем или усилителем мощности, но не фазоинвертором.

6.3. Размещение петли эффектов внутри схемы предусилителя.

Петля эффектов Soldano стоит за четвёртым каскадом, который имеет самую низкую входную чувствительность в канале Overdrive. Это гарантирует, что сигнал будет ограничен до петли. Педали эффектов, таким образом, работают уже с перегруженным звуком, и поэтому не влияют на характер перегруза. Так, например, при использовании эффекта реверберации в предусилителе создаётся искажение основного звука, а не искажение звука с эффектом реверберации.

6.4. Ограничение полосы пропускания сигнала.

В трёх усиливающих каскадах Soldano используются относительно небольшие блокировочные катодные конденсаторы. Частичная блокировка катода создаёт отрицательную обратную связь для низких частот, обеспечивая их затухание.

В отличие от Fender Bassman и других классических усилителей, созданных до эпохи экстремального овердрайва, третий каскад Soldano включает в себя конденсатор, шунтирующий анодный резистор с отсечкой -3дБ по частоте 2.2кГц. Любые высокочастотные помехи от гитарных звукоснимателей, которым удалось пройти через резистор сеточного блокиратора, будут здесь значительно ослаблены. На характере перегрузки и гармонических искажениях это не скажется, то есть, этот усилитель даёт много высоких частот в звуке. Схема, разработанная Soldano, открывает дорогу гармоническим искажениям, порождённым преимущественно основными гитарными частотами и гармониками низкого порядка. Наличие высоких частот создают характерную перегрузку этого усилителя.

Звучание соло-гитары обычно имеет диапазон только в двух или трёх октавах. Ограничение полосы пропускания уменьшает интермодуляционные искажения и множество посторонних нежелательных гармонических искажений, которые могут добавить «грязи» в звук.

6.5. Создание высокого входного сопротивления.

В традиционных конструкциях усилителей мощности (power amp) их первый каскад формирует все искажения. За исключением каких-то не стандартных моментов, это единственный каскад, влияющий на смещение выходных ламп, который вносит существенную долю перегруза и динамики в класс работы АВ. Без правильной организации, однако, это влияние на смещение может привести к весьма нежелательным последствиям, таким как блокировочные искажения.

Где-то до 4-го деления регулятора Master Volume усилитель Soldano создаёт возможность формировать перегрузку в предусилителе, позволяя усилителю мощности оставаться относительно чистым. Это сдвигает роль в формировании перегруза к предусилителю. Для предотвращения блокировочных искажений Soldano использует сеточные блокираторы, причём такие, чтобы поддерживать входное сопротивление перегружающихся каскадов высоким, даже если сетка стремится в нулю вольт. Только на первом каскаде, перегрузка которого маловероятна, входное сопротивление составляет менее 220кОм.

С точки зрения сетки, именно высокое сопротивление сеточного блокиратора и формирует это большое входное сопротивление. Высокое выходное сопротивление оказывается неспособным обеспечить ток, необходимый для создания на сетке любого положительного напряжения. Это делает резким переход следующего каскада из линейной зоны к тяжёлым искажениям.

Большие значения сеточных блокираторов оказывают существенное влияние на высокие частоты, но в конечном звуке все равно достаточно много яркости.

6.6. Наличие катодного повторителя в цепи Overdrive.

Первый усиливающий триод четвёртого каскада непосредственно связан с катодным повторителем. Это оказывает существенное влияние на ограничение сигнала.

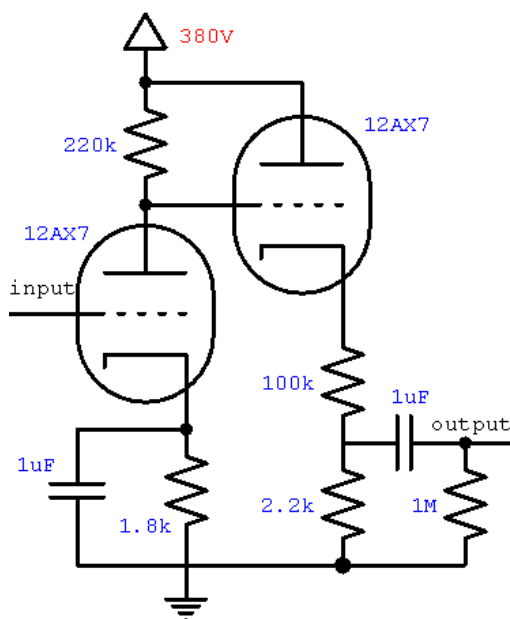


Рисунок 24: Четвертый каскад предусилителя Soldano SLO 100

Перегруженный катодный повторитель при положительной полуволне вызывает падение напряжения анод-катод, что делает сетку более привлекательной для электронов. В результате увеличение сеточного тока приводит к увеличению тока текущего через анодный резистор усиливающего триода, ограничивая тем самым напряжение на нём.

Когда усиливающий триод приближается к отсечке, входное сопротивление катодного повторителя падает с очень высокого, которое желательно для легкой нагрузки, до очень низкого значения, что вносит коррективы в работу схемы. Это обостряет отсечку сигнала и делает его более симметричным, ограничивая в противоположном направлении. Как отмечает Rutt, этому нет эквивалента в транзисторных схемах.

6.7. Обеспечение адекватной низкочастотной развязки.

Сигнальная часть Soldano имеет очень большое количество триодов перед фазоинвертором, целых семь! Тем не менее, не более двух инвертирующих усиливающих каскадов имеют общую точку питания. Это обеспечивает адекватную развязку для предотвращения низкочастотной обратной связи, которая может привести к гулу в звуке. Чтобы сохранить напряжение высоким, в Soldano используются параллельные фильтры питания для первых двух каскадов.

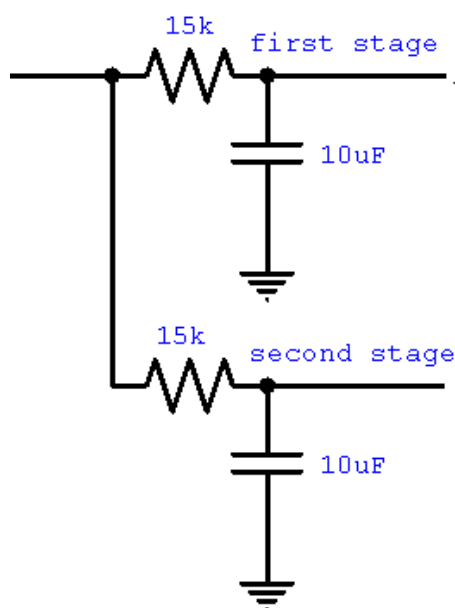


Рисунок 25: Схема параллельных фильтров питания для первых двух каскадов предусилителя

6.8. Предотвращение паразитных колебаний.

Проводам присущи индуктивность и ёмкость, что, в свою очередь, может привести к паразитным колебаниям. Это крайне нежелательное воздействие, которое часто встречается на радиочастотах, вызывается паразитной обратной связью между выходными и входными цепями. И усилители Hi-Gain особенно восприимчивы к этому.

Поэтому в Soldano особенно «щедро» используются сеточные блокираторы, которые помогают ослабить всплески паразитных колебаний. Конденсатор, шунтирующий анодный резистор в третьем каскаде, также ослабляет высокочастотные помехи, эффективно изолируя предшествующие каскады от последующих по тем частотам, на которых может произойти возбуждение. Стоит подчеркнуть, однако, что сеточные блокираторы, шунтирующие конденсаторы, и другие активные меры борьбы эффективны только в контексте их грамотного расположения в сигнальной цепи. Размещение деталей и проводов играет решающую роль в сборке Hi-Gain предусилителя.

6.9. Создание оптимального баланса сигнал/шум.

В звуке усилителя Hi-Gain помимо полезного звука всегда присутствует шум. Входной каскад Solano использует классическую обвязку: сеточный блокиратор 68кОм и резистор утечки сетки 1МОм. Это позволяет сигналу с любого звукоснимателя полностью пройти на первую лампу. Ослабление и частотная коррекция производятся только после того, как сигнал достаточно усилен, чтобы успешно конкурировать с шумом, создаваемым предыдущими схемами (каскадами или устройствами).