

# **Ультралинейный режим пентода в предварительных каскадах усиления**

*Евгений Карпов*

При проектировании ламповых усилителей достаточно часто возникает проблема получения заданного коэффициента передачи такта. Особенно неприятно, когда надо получить усиление в районе  $30\div 40\text{dB}$ . Одиночный каскад на триоде не может обеспечить нужное усиление, а одиночный каскад на пентоде, учитывая требования хорошей линейности, имеет усиление больше необходимого.

Естественно, хочется получить все сразу – нужное усиление, минимальное число каскадов и хорошую линейность.

К таким обобщенным пожеланиям добавились еще и специфические требования, связанные с использованием каскада. Каскад предназначался для компенсации потерь в корректирующих цепях предварительного усилителя и, соответственно, должен был иметь большое входное сопротивление и малый уровень шумов.

Так как общая ООС, охватывающая несколько каскадов, для истинных аудиофилов что-то вроде красной тряпки для быка, то этот вариант даже не рассматривался. Справедливости ради следует сказать, что в таком неприятии есть доля объективных факторов, которые можно частично обойти схемотехнически, но это приводит к существенному усложнению схемы.

Поэтому основное внимание было уделено каскаду на пентоде и способам уменьшить его усиление до нужного значения.

В общем, получалось так, что без обратной связи никак не обойтись. Другой разговор - как ее реализовать.

Каких неприятностей можно ожидать от классических вариантов введения местной ОС, в общем, было понятно, но меня заинтересовал другой вариант – введение ОС в цепь второй сетки пентода. Метод этот давно известен, широко применяется в выходных каскадах усилителей, но очень редко используется в предварительных каскадах. И судя по полученным результатам, совершенно зря.

Хочу отдельно обратить внимание читателей на один очень важный момент. По формальным признакам подача части выходного сигнала в цепь второй сетки - это обратная связь, но механизм ее действия существенно другой. Если классический вариант введения ОС предполагает векторное суммирование входного и части выходного сигнала, то в случае введения сигнала в цепь второй сетки, изменяются динамические характеристики лампы.

В общем, описывать все промежуточные варианты реализации каскада не имеет смысла, и на рисунке 1 показан его окончательный вариант. Для обеспечения возможности работы на достаточно длинный межблочный кабель каскад был дополнен выходным катодным повторителем. Сразу хочу сказать, что был опробован вариант реализации только на лампах, никаких объективных и субъективных преимуществ он не показал, а такой гибридный вариант получается проще и экономичнее.

Усилительный каскад (VL1) выполнен по классической схеме с автоматическим смещением. Сигнал ОС вводится в цепь второй сетки с помощью истокового повторителя (VT1) с выхода каскада.

Для получения хорошей линейности и симметричного импульсного отклика в выходном катодном повторителе используется каскодный источник тока.

Ниже приведены основные параметры каскада, все измерения проводились в режиме, близком к рабочему – выходное напряжение  $2V_{\text{RMS}}$ , сопротивление нагрузки –  $10\text{k}\Omega$ , емкость нагрузки –  $200\text{pF}$ .

Коэффициент усиления	60
Мощностная полоса	$10\text{Hz}\div 1\text{MHz}$
Скорость нарастания выходного напряжения	$20\text{V}/\mu\text{S}$
Выходное сопротивление	$70\Omega$
Входная емкость	$120\text{pF}$
Коэффициент гармоник	0.02%
Максимальное выходное напряжение (THD = 0.07%)	$10V_{\text{RMS}}$

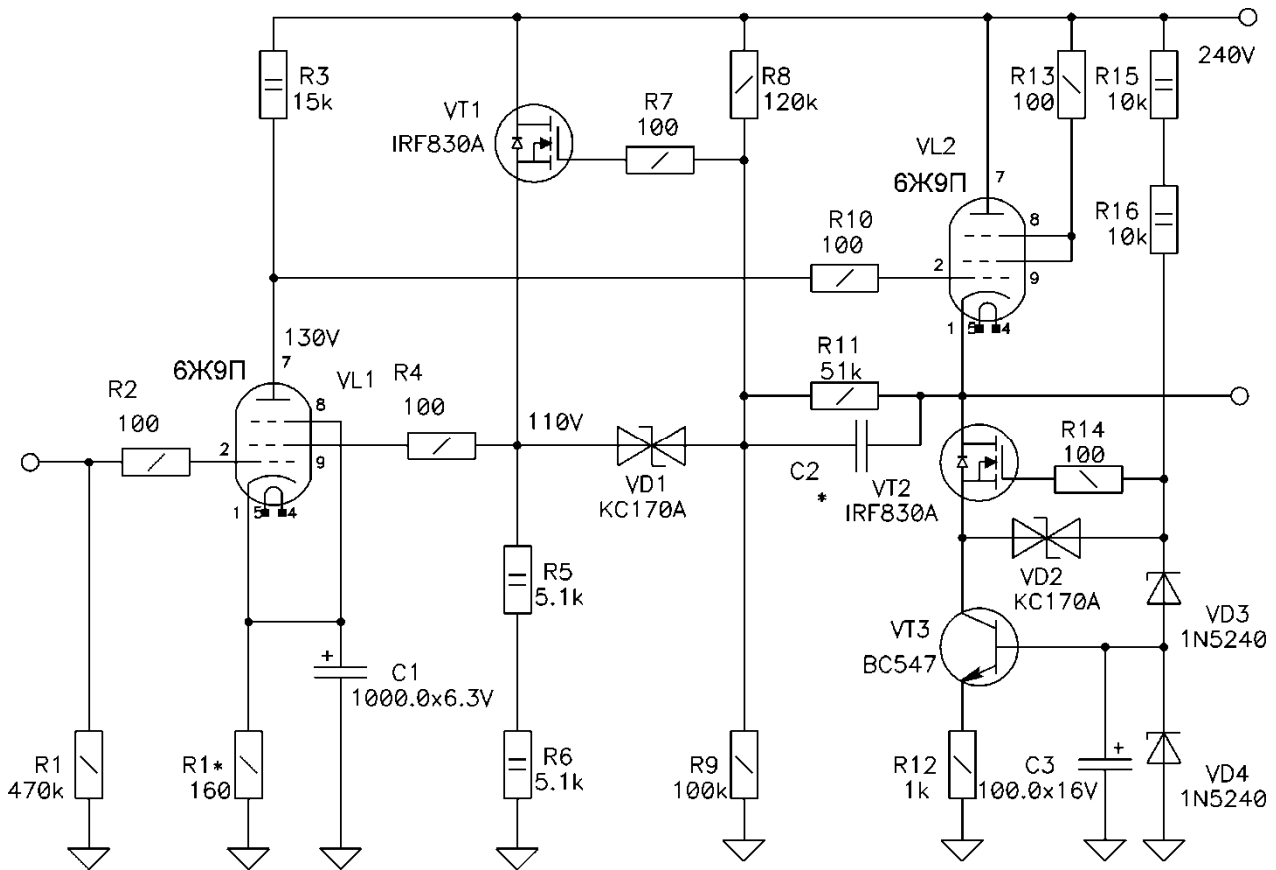


Рисунок 1

Глубина ОС в таком каскаде определяется не только величиной напряжения ОС, поступающей на вторую сетку, но и параметрами самой лампы. Манипулируя величиной анодной нагрузки усильтельной лампы VL1 (выбирая оптимальную рабочую точку) и коэффициентом делителя, определяющего глубину ОС (R8, R9, R11), можно получить нужный коэффициент усиления при максимальной линейности каскада.

Строго говоря, оптимизацию режима нужно делать для каждой конкретной лампы, но хорошие результаты также получаются, если проделать такую оптимизацию один раз для ламп одного типа.

Наиболее любопытным оказалось прямое сравнение параметров каскада при введении классической параллельной ОС и ОС, введенной через вторую сетку (таблица 1). В обоих случаях режим лампы по постоянному току оставался неизменным и, конечно, исследовалась одна и та же лампа.

Таблица 1

Режим работы	Коэффициент усиления	Уровень второй гармоники (dB)	Уровень третьей Гармоники (dB)	Коэффициент гармоник (%)
Без ОС	150	-62	-86	0.08
Парал. ОС	60	-66	-83	0.045
УЛ режим	60	-75	-97	0.017

Гармоники более высоких порядков зарегистрировать не удалось. Или они отсутствуют, или лежат ниже уровня -130dB.

Собственно говоря, результаты говорят сами за себя – перевод пентода в ультралинейный режим при заданном коэффициенте усиления позволил получить существенно лучшую линейность, чем при введении классической ОС. Обратите внимание, что в ультралинейном режиме снижаются обе регистрируемые гармоники, а при введении параллельной ОС, снижается только вторая гармоника. Несколько неожиданным оказалось возрастание третьей гармоники, хотя глубина ОС весьма мала. Кроме того, в ультралинейном режиме немного меньше уровень шума каскада и уровень вносимых искажений практически не зависит от частоты усиливаемого сигнала.

Каскад имеет неплохие динамические характеристики, но несмотря на принятые меры, все-таки есть разница между скоростью нарастания и спада при передаче импульсного сигнала. Рассчитывать на полную симметрию фронтов в одноканальном усилителе не стоит, но если усилитель имеет достаточно высокую скорость нарастания фронта, этот врожденный недостаток не так сказывается. Конечно, при работе на комплексную нагрузку основное влияние на передачу импульсного сигнала оказывает выходной повторитель. Использование источника тока в катоде позволяет уменьшить разницу между скоростью нарастания и спада фронтов почти на порядок. Следует иметь в виду, что чрезмерная емкостная нагрузка на выходе не только увеличивает длительность фронта, но и приводит к появлению на фронтах импульсов выбросов (это к мифу о «звучащих» кабелях). В принципе, это характерно для каскадов любого типа, основной способ уменьшения выбросов – увеличение тока покоя и снижение выходного сопротивления каскада. Правда, если усилитель вообще не способен корректно передать фронт, то и проблема выбросов становится не актуальной. В качестве иллюстрации на рисунках 2 и 3 показан фронт импульса при номинальной (200pF) и повышенной (400pF) емкости нагрузки.

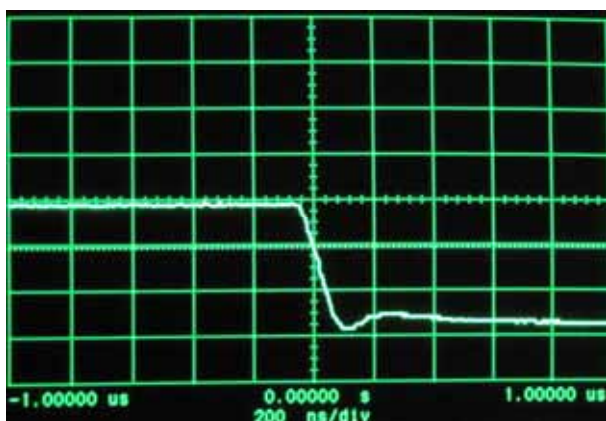


Рисунок 2

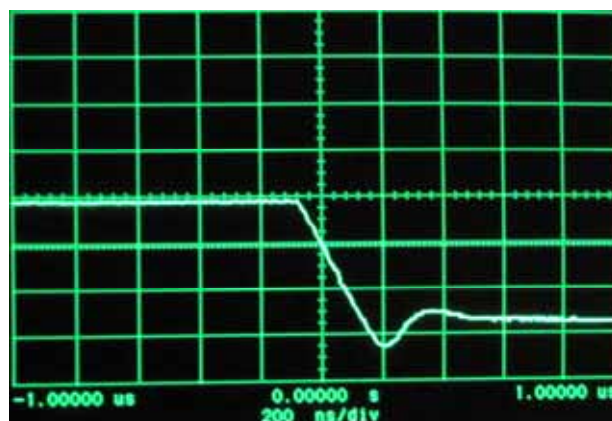


Рисунок 3

В каскаде были опробованы лампы разных типов. Хорошие результаты показали лампы типа – 6Ж38П, 6Ж52П, EF86, но лампа типа 6Ж9П оказалась вне конкуренции (вообще, и в триодном режиме лампа очень даже неплоха).

Повторение каскада не вызывает особых затруднений. При монтаже следует учитывать его широкополосность и обратить особое внимание на взаимоположение компонентов и правильную разводку «земляных» цепей. Налаживание каскада заключается в установке нужного напряжения на аноде VL1 (резистор R1) и подстройке коэффициента усиления резистором R11. После установки коэффициента передачи необходимо повторно подстроить режим лампы VL1. Без ухудшения параметров каскада коэффициент передачи можно менять на 15÷20% в обе стороны. В случае значительного уменьшения коэффициента усиления повторную оптимизацию можно не проводить, если коэффициент усиления значительно увеличивается, то желательно заново оптимизировать параметры каскада. Емкость C2 служит для выравнивания частотной характеристики в об-

ласти высоких частот (700÷800 кГц), если вы не имеете возможность проверить частотную характеристику в этой области, то поставьте емкость величиной 10÷15pF.

Наладку каскада можно несколько упростить, если «развязать» режим по постоянному току анодной и сеточной цепи VL1. Для этого последовательно с R11 включается емкость в несколько микрофарад (с рабочим напряжением не менее напряжения питания), это не меняет параметры каскада, но требуется лишний компонент.

Питание каскада желательно стабилизировать и обязательно обеспечить малый уровень пульсаций анодного напряжения.

В заключение хочу заметить, что такой метод введения ОС не универсален и в какой-то степени может считаться техническим курьезом. Но с другой стороны, если требования к каскаду вписываются в граничные условия, позволяет создавать короткие звуковые тракты с исключительно высокими объективными и субъективными характеристиками.