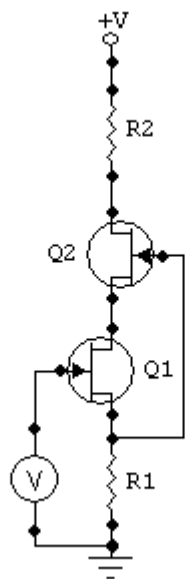


## Параметрическая линейризация полевого транзистора или Как сделать твердотельный "триод"

Обыкновенно, при сравнении полевого транзистора с вакуумной лампой, его сравнивают с пентодом, поскольку у транзистора, как у пентода, высокое выходное динамическое сопротивление. Вакуумный триод имеет низкое внутреннее сопротивление, но, с другой стороны, он обладает интересным свойством - повышенной линейностью передаточной характеристики при работе на высокоомную (значительно превышающую внутреннее сопротивление лампы) нагрузку. Эта повышенная линейность есть следствие параметрической линейризации - при увеличении тока через лампу падает анодное напряжение и крутизна передаточной характеристики остаётся примерно постоянной, и искажения такого каскада сравнительно невелики.

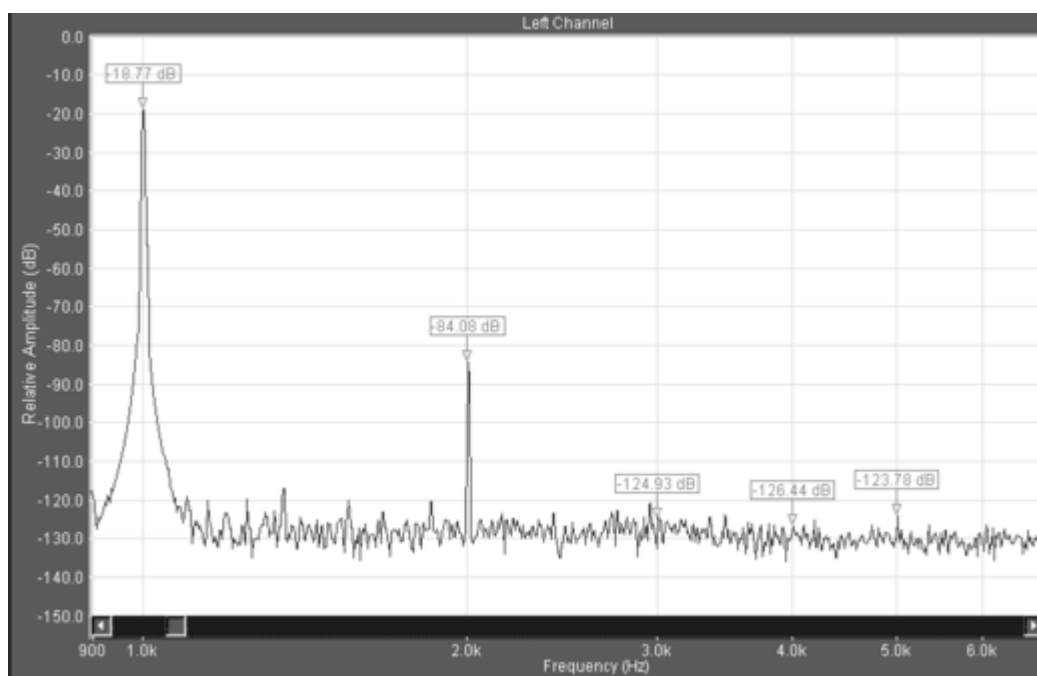
Я применил подобный же подход для линейризации передаточной характеристики полевого транзистора. На первый взгляд в схеме (Илл. 1) нет ничего необычного - она многократно описана и приведена в разных источниках, включая, например, "Искусство Схемотехники" Хоровица и Хилла (1). Это каскодное включение используется для уменьшения эффекта Миллера и увеличения выходного сопротивления каскада по сравнению с одиночным транзистором. Обычная рекомендация при таком включении - применение "верхнего" транзистора с напряжением затвор-исток в рабочей точке заметно выше перегиба выходной характеристики "нижнего" транзистора, для получения максимального выходного сопротивления и усиления.



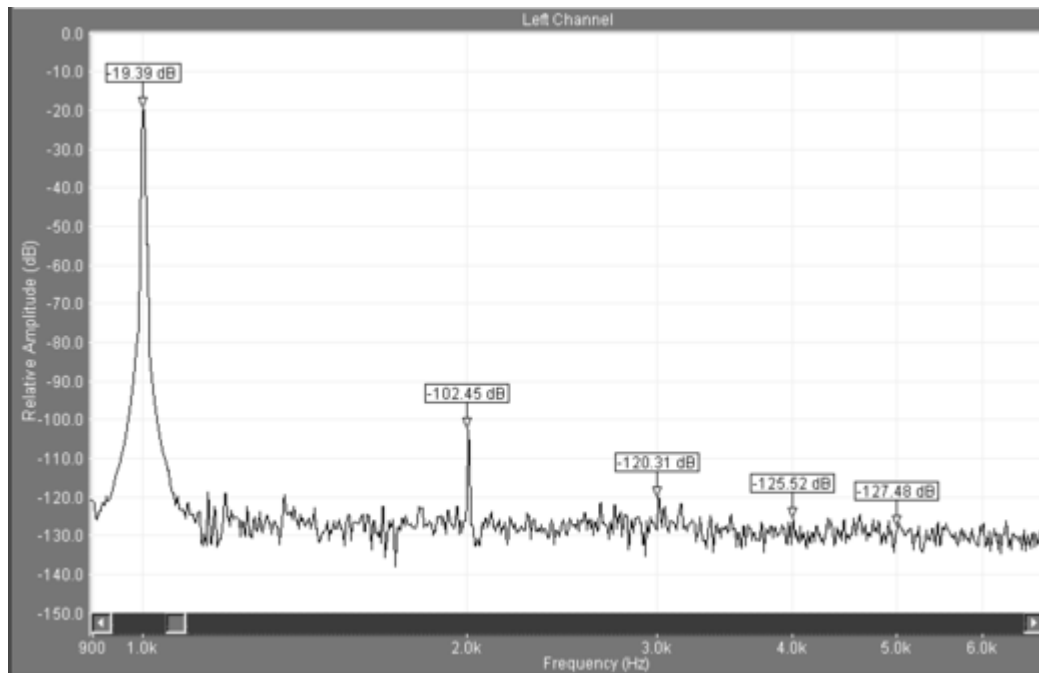
Илл. 1

Но, оказывается, самое интересное происходит, если выбрать параметры транзисторов таким образом, что "нижний" транзистор будет работать, по существу, ниже точки перегиба выходной характеристики, на так называемом "активном" участке с малым выходным сопротивлением стока. При

определённом сочетании параметров транзисторов "нижний" транзистор становится твердотельным эквивалентом вакуумного триода в плане повышенной линейности передаточной характеристики. Точно так же, как в триоде при увеличении тока анода падение анодного напряжения сохраняет крутизну постоянной, так же и здесь при увеличении тока стока уменьшение напряжения сток-исток может в нужной точке характеристики сохранять крутизну близкой к постоянной, "выпрямляя" передаточную характеристику. Как видно на иллюстрациях 2 и 3 снижение уровня искажений может быть весьма заметным. В обоих случаях входное напряжение составляет 100 мВ эфф. На Илл. 2 показан спектр выходного сигнала при удалении из схемы (закорачивании) "верхнего" транзистора Q2 ( $HD2 = 0.06\%$ ), на Илл. 3 - в каскодном включении ( $HD2 = 0.007\%$ ). Разумеется, R1 имеет одинаковое значение в обоих случаях, подобранное для нужной рабочей точки в каскодном включении. Можно видеть, что уровень второй гармоники уменьшился примерно на 18 дБ, хотя усиление упало только на 0.7 дБ.



Илл. 2



Илл. 3

Надо отметить, что в данной схеме требуется принять меры по уменьшению температурной зависимости рабочей точки. Я выяснил, что можно найти комбинации транзисторов, которые сохраняют высокий уровень линейности передаточной характеристики (в рабочей точке) в широком диапазоне температур. По понятным причинам я не привожу здесь детали - какие именно типы транзисторов я использовал и как именно я произвожу подбор нужных пар. Тем не менее этот метод линейзации работает достаточно хорошо, чтобы его можно было применять в практических схемах - к примеру я применил эту схему в каскаде УН в усилителе для наушников A.N.T. "Amber" .

Литература: 1) The Art of Electronics, P Horowitz and W Hill, Second Edition, page 129.

©2004 Alex Nikitin

London, UK