

Аналог ультралинейного режима в выходном каскаде

Евгений Карпов

Возможность реализации ультралинейного режима при отсутствии выходного трансформатора я уже рассматривал в приложении к маломощным пятиэлектродным лампам [1]. В общем, никто не запрещает реализовать подобным образом ультралинейный режим и для мощной лампы выходного каскада при наличии выходного трансформатора.

На рисунке 1 показана схема такого каскада. Фактически, это реальный выходной каскад, схема которого была упрощена для удобства изложения.

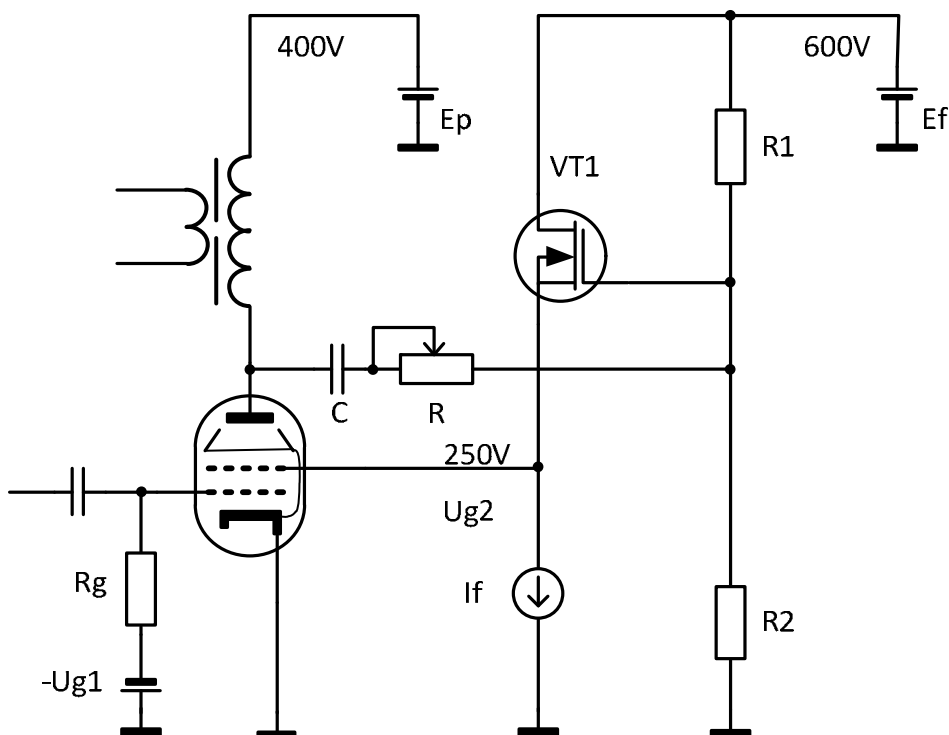


Рисунок 1

Основой схемы служит классический однотактный каскад на мощном лучевом тетроде (6P3C). Источковый повторитель обеспечивает задание режима второй сетки по постоянному току (делитель на резисторах R1, R2) и передает на нее часть переменной составляющей анодного напряжения. Уровень переменной составляющей на второй сетке определяется делителем, образованным переменным резистором R и делителем R1, R2.

Несмотря на усложнение схемы, по сравнению с классической реализацией с помощью отвода от обмотки трансформатора, такое решение имеет ряд преимуществ.

Во-первых, можно обеспечить статический режим работы второй сетки без превышения допустимых параметров и повышать анодное напряжение лампы. Это благоприятно сказывается на КПД каскада и его линейности.

Во-вторых, существенно меньшие фазовые сдвиги цепи ОС в широком диапазоне частот уменьшают вероятность самовозбуждения каскада.

В-третьих, появилась возможность плавно регулировать глубину ОС на вторую сетку. Фактически, прямо «на ходу» можно переводить каскад из пентодного режима в триодный.

Хочу напомнить читателям – ультралинейный режим был запатентован D. Hafler, H.I. Keroes в 1955 году [2].

Классическая схема рассматривается как каскад с распределенной нагрузкой, а глубина ОС определяется как коэффициент распределения нагрузки – p .

$$p = \frac{Z_s}{Z_a} = \left(\frac{W_s}{W_a}\right)^2 = \left(\frac{U_s}{U_a}\right)^2$$

Где:

Z_s, Z_a - приведенное сопротивление в цепи экранной сетки и анода лампы,

W_s, W_a - число витков экранной сетки и полное число витков первичной обмотки,

U_s, U_a – переменная составляющая напряжения на экранной сетке и на аноде лампы.

Из формулы видно, что можно оперировать не приведенными сопротивлениями, а непосредственно переменными напряжениями на электродах лампы, что собственно и позволяет говорить об аналогичности режимов работы. В дальнейшем, мы будем оперировать именно отношением $\frac{U_s}{U_a}$, что в такой схеме больше соответствует физическим процессам.

В этом же патенте было определено оптимальное значение $p=0,185$ (что соответствует $\frac{U_s}{U_a} = 0.43$).

И там же было показано, что величина « p » может изменяться в широких пределах в зависимости от задачи и типа лампы. К сожалению, вычисление оптимального значения « p » аналитически - вообще проблематично, а экспериментальное определение - очень трудоемко. Это приводит к тому, что используют усредненную величину « p » для разных ламп, и в результате потенциальные возможности ламп не используются в полном объеме.

Приведенная выше схема позволяет настроить оптимальное значение $\frac{U_s}{U_a}$ для конкретного режима и конкретного типа ламп.

Основной целью написания этой статьи является не столько описание выходного каскада такого типа (хотя, он сам по себе достаточно интересен), сколько презентация очень любопытного и ранее не описанного явления, всплывшего при его детальном исследовании.

Изменение отношения $\frac{U_s}{U_a}$ вблизи оптимального значения приводит к существенным изменениям спектра продуктов искажений, хотя интегральное значение коэффициента гармоник каскада изменяется мало.

Если во главу угла ставится получение максимальной линейности или получения желаемого спектра искажений, это явление дает в руки проектировщика достаточно мощный инструмент, позволяющий производить тонкую настройку схемы.

В какой-то степени, это явление может объяснить и разительное отличие звука при замене выходных ламп в двухтактных усилителях с ультралинейным включением, хотя лампы имеют сходные параметры.

Эксперимент проводился следующим образом – выходной каскад возбуждался драйвером с малыми собственными искажениями, на выходе каскада поддерживалась постоянная мощность ($U_a=const, P=8W$), напряжения питания каскада были стабилизированы, нагрузка активная.

Измерялся интегральный коэффициент гармоник выходного напряжения и уровни гармонических составляющих относительно фундаментальной.

Результаты измерений приведены в таблице 1, и в графическом виде на рисунке 2. Чтобы не затемнять результатов, результаты измерений в таблице приведены с достаточно большим шагом. Промежуточные значения при линейной интерполяции хорошо согласуются с реальными измерениями.

ρ	Us/Ua (%)	THD (%)	Гармоники (dB)							
			2	3	4	5	6	7	8	
0,08	29	3,9	-28,1	-49,8	-70,8	-64,6	-72,5	-75,6	-84,0	
0,12	34	3,9	-28,1	-56,0	-65,2	-66,2	-73,5	-77,9	0	
0,16	40	3,9	-28,2	-73,5	-66,4	-66,6	-75,6	0	0	
0,21	46	4,0	-28,0	-62,1	-68,2	-63,9	-71,1	0	-79,0	
0,26	51	4,2	-27,5	-56,2	-65,8	-64,3	-95,9	-79,5	-72,9	

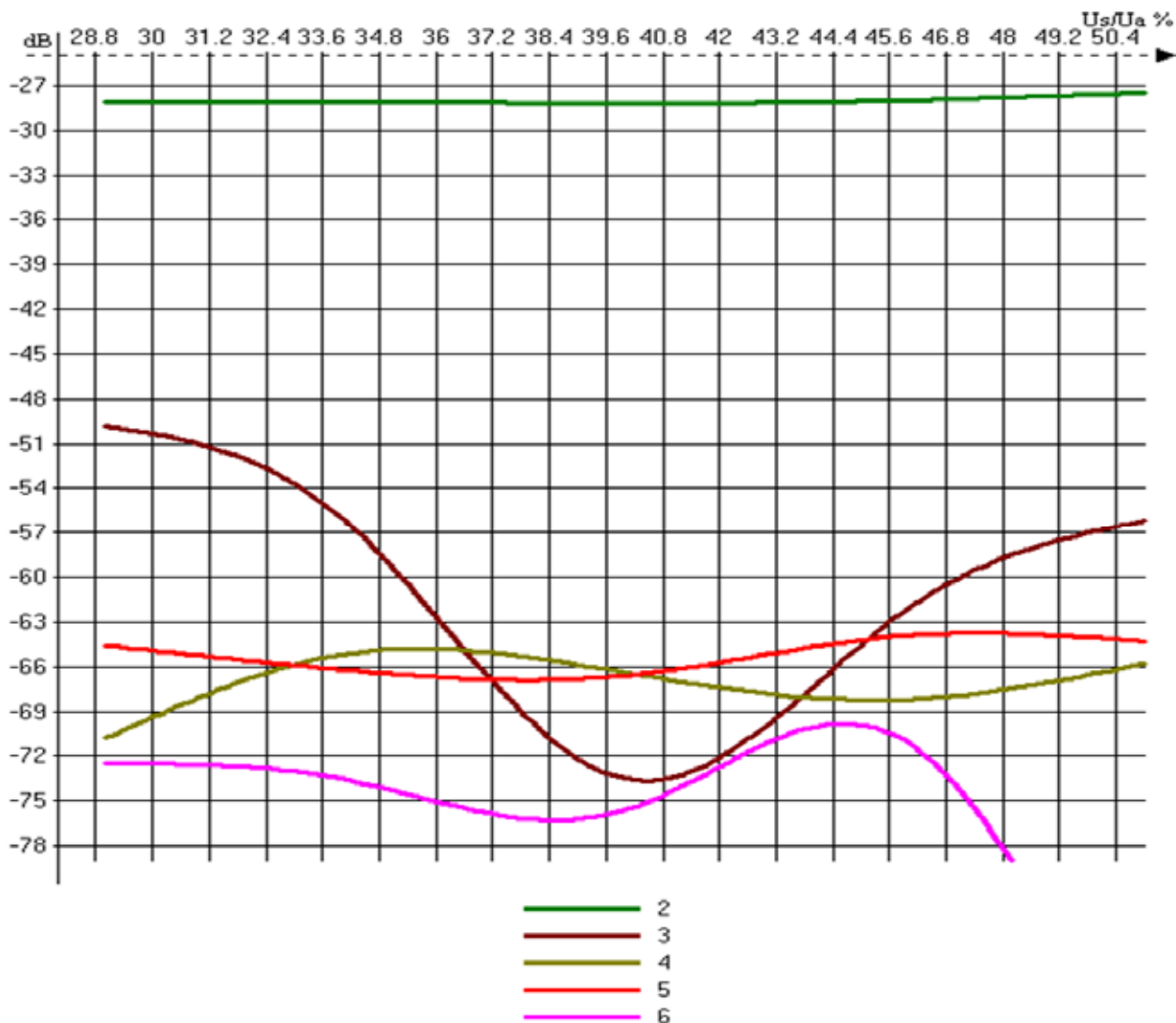


Рисунок 2

Для других типов ламп, конечно, графики получаются немного другие, но общая тенденция изменения уровней гармонических составляющих сохраняется.

Литература

1. [Карпов Е.В., Ультранинейный режим пентода в предварительных каскадах усиления, интернет издание, 2010.](#)
2. [D. Hafler, H.I. Keroes, ULTRA LINEAR AMPLIFIERS, US patent, 1955](#)