

СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ОДНОТАКТНЫЙ КАСКАД НА ВАКУУМНОМ ТРИОДЕ

Евгений Карпов

В статье приведена схема и рассмотрен принцип работы лампового выходного каскада с повышенной линейностью.

Эта статья является логическим завершением темы, начатой еще 2003 году в статье «Гибридный мир». Там впервые была рассмотрена схема с динамически управляемым током нагрузки источником тока в твердотельном повторителе. В дальнейшем, этот принцип был перенесен в ламповую схемотехнику («Принцесса»). Катодные повторители такого типа имеют отличные характеристики, но коэффициент передачи меньше 1 создает определенные сложности при построении драйвера.

Перенос управляемого источника тока в анодную цепь лампы позволяет получить от выходного каскада коэффициент усиления близкий к μ лампы и существенно повысить линейность каскада. Получившийся выходной каскад имеет два ассиметричных активных плеча, и его уже нельзя однозначно отнести к однотактному каскаду, хотя сигнал непосредственно усиливается только одним плечом. Формально, такой каскад можно рассматривать как модификацию двухтактного каскада – есть два плеча, работающих (условно) в противофазе. Но второе плечо управляется током нагрузки, а не противофазным входным сигналом. Каскад обладает смешанным набором признаков и не соответствует ни одному классическому определению выходного каскада в полном объеме.

Я все-таки больше склонен его считать однотактным каскадом со стабилизацией динамического режима лампы. Исходя из этого, и появилось название – Стабилизированный Однотактный Каскад (Equalized Single End – ESE).

Как он работает?

На рисунке 1 показаны две схемы: классический однотактный каскад (a) и каскад ESE (b).

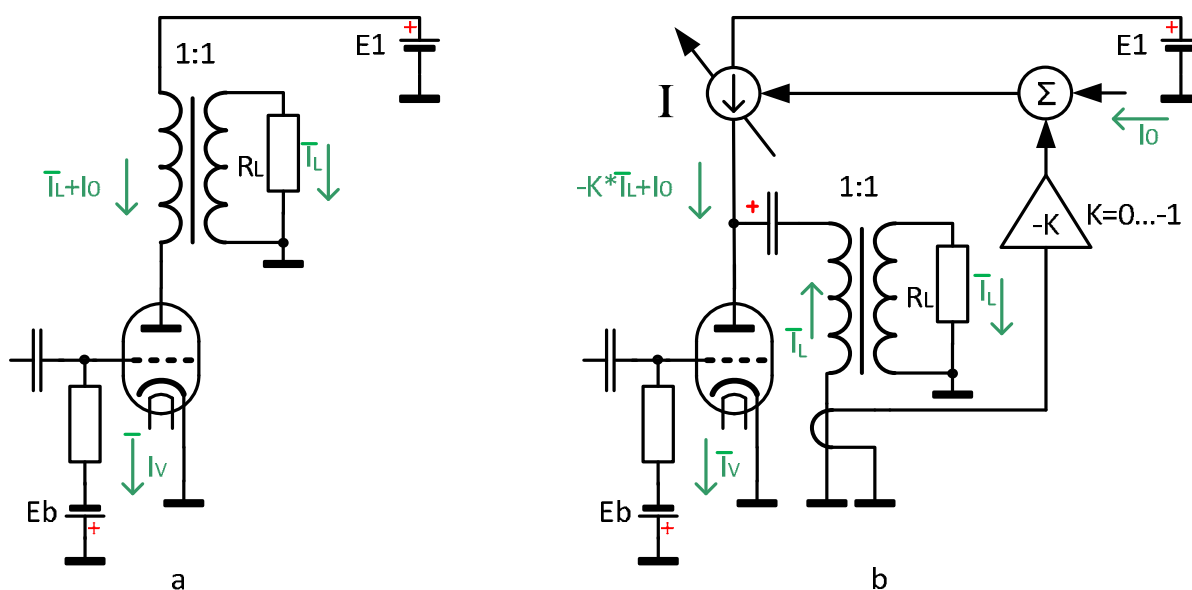


Рисунок 1

Рисунок 1a комментариев не требует. Каскад ESE сложнее: в цепь анода лампы включен управляемый источник тока I . Управляющее воздействие для него формируется из двух составляющих: I_0 – ток покоя каскада и тока нагрузки I_L с масштабным коэффициентом $-K$. Предположим, что оба каскада имеют одинаковый ток покоя и одинаковую выходную мощность. Соответственно, ток нагрузки (I_L) будет одинаковым, также будем считать лампу достаточно линейной, а трансформатор – идеальным.

На рисунке 2 показаны эпюры токов в обоих каскадах. Допустим, на вход каскада поступает положительная полуволна сигнала. В классическом каскаде это приведет к отпирианию лампы и нарастанию ее тока, так как через лампу будет протекать сумма тока нагрузки и тока покоя – $I_L + I_0 = I_V$.

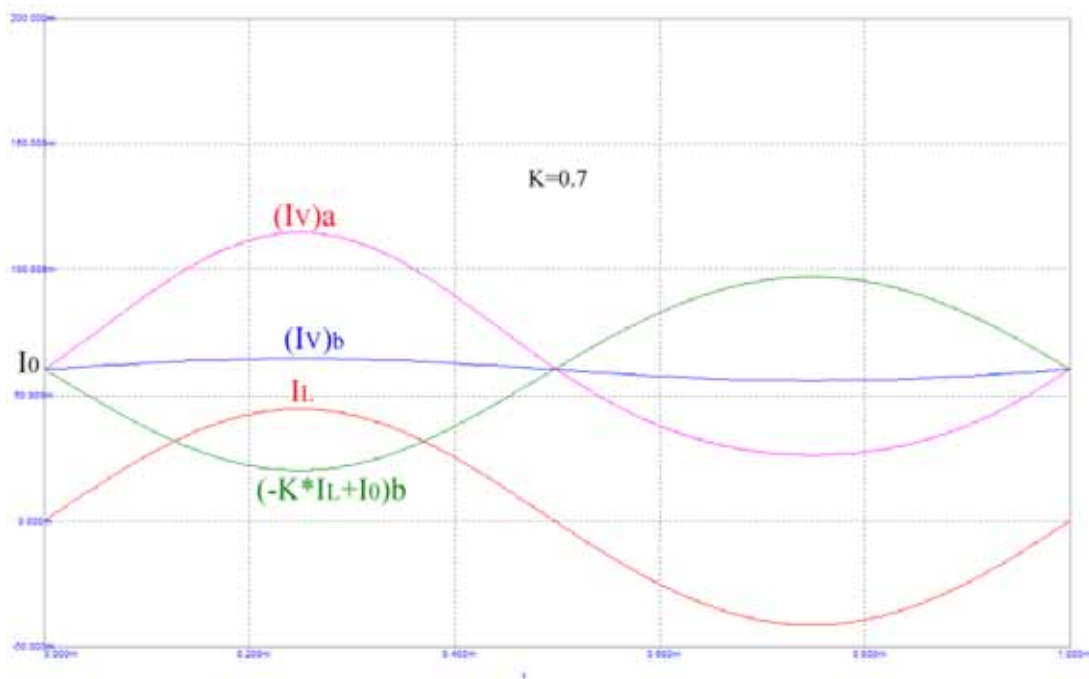


Рисунок 2

В ESE каскаде картина будет другая. Отпирание лампы приводит к возникновению тока нагрузки, и ток через лампу начинает нарастать. Информация о токе нагрузки с датчика тока с некоторым масштабным коэффициентом поступает на вход источника тока, выходной ток источника тока начинает уменьшаться, что частично компенсирует нарастающий ток нагрузки через лампу. Соответственно, эквивалентное изменение тока лампы уменьшится. Изменение полярности входного сигнала приведет к такому же эффекту – изменение направления тока нагрузки будет вызывать увеличение тока источника тока так, что изменение тока лампы уменьшится.

Если перейти к более строгой терминологии, то можно сказать: в каскад добавлена **разомкнутая** следящая система, уменьшающая диапазон динамического изменения тока лампы.

А зачем это вообще надо?

Для прояснения этого вопроса построим нагрузочные прямые для обоих типов каскадов непосредственно на анодных характеристиках лампы (Рисунок 3). Черная линия соответствует классическому каскаду или $K=0$, толстая красная линия - $K=0.7$. Возможные промежуточные положения показаны пунктиром. Из рисунка хорошо видно, что введение динамической стабилизации тока приводит к развороту и уменьшению длины нагрузочной прямой при одинаковом размахе переменного напряжения на аноде. Если посмотреть на это дело с «позиций» лампы, то это эквивалентно изменению приведенного сопротивления нагрузки. При $K=1$ нагрузочная линия становится параллельной оси абсцисс, что эквивалентно работе лампы на холостом ходу. Если теперь обратиться к графикам, показывающим изменение параметров лампы от тока анода (Рисунок 4), то становится понятным, что уменьшение изменения размаха тока анода и, соответственно, длины нагрузочной линии, повышает линейность каскада и стабилизирует его выходное сопротивление. Дальнейшее повышение линейности каскада и уменьшения его выходного сопротивления можно достигнуть оптимальным совместным выбором рабочей точки и коэффициента K .

Все эти выводы делались в предположении, что управляемый источник тока искажений не вносит. На самом деле источник тока имеет собственные искажения, хотя и весьма малые. Это приводит к отклонению мгновенного положения точки нагрузочной прямой от расчётного значения и росту искажений на выходе каскада. Собственно говоря, увеличиваются искажения, генерируемые самой лампой. Прямого векторного суммирования гармоник здесь не происходит.

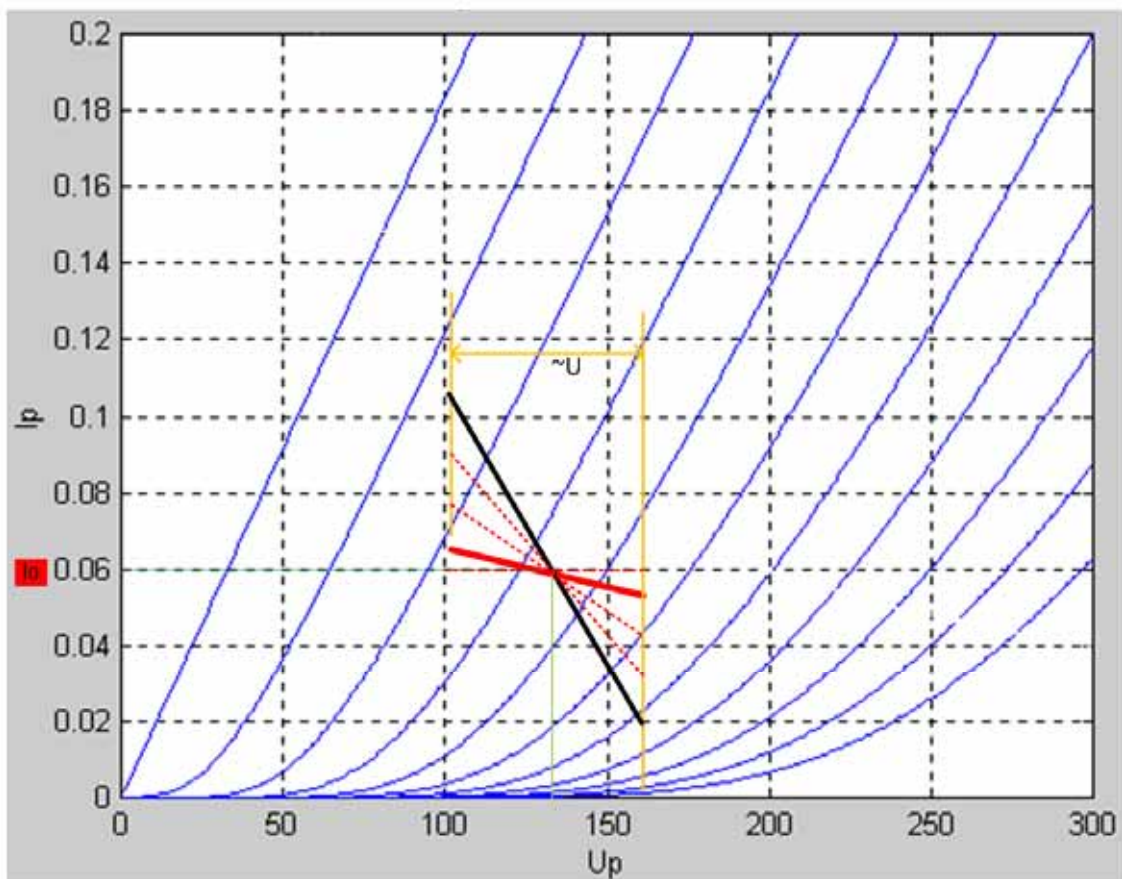


Рисунок 3

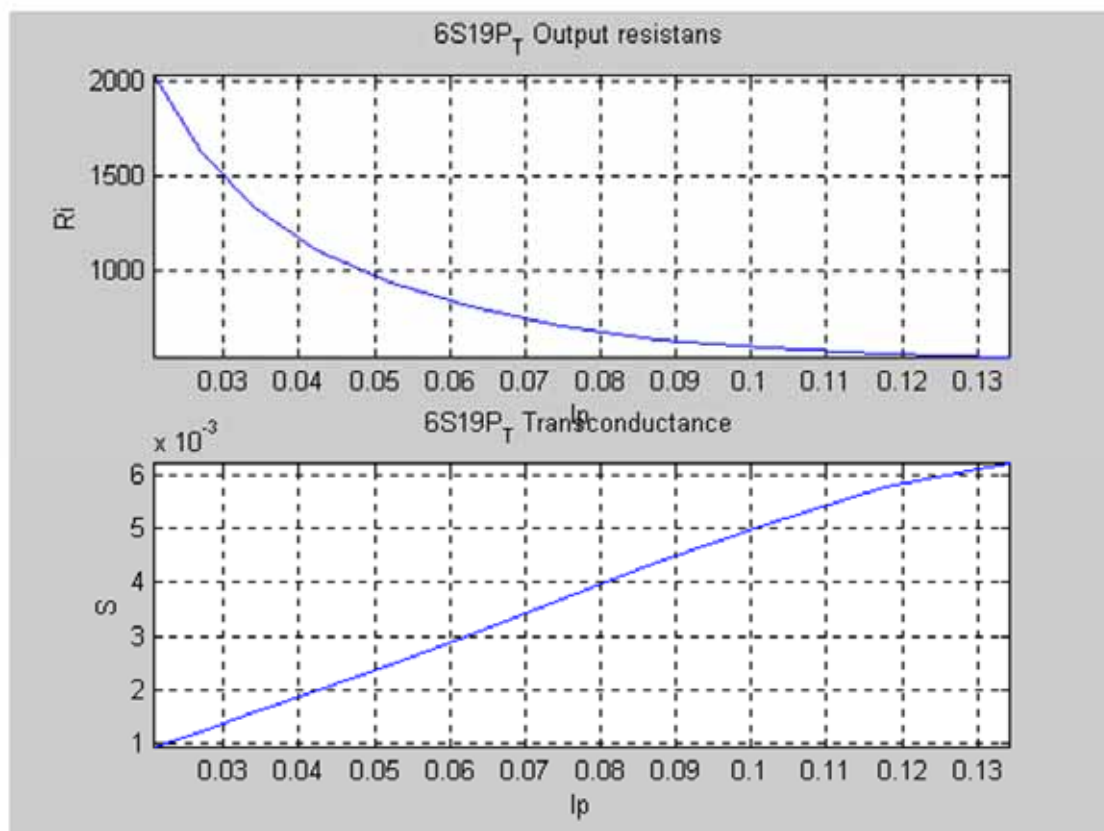


Рисунок 4

Аналитический расчёт влияния гармоник источника тока получается чрезвычайно громоздкий и не точный. Практические измерения показали, что выделить влияние нелинейности источника тока не представ-

ляется возможным, а изменение нелинейности каскада в зависимости от типа источника тока находится на уровне ошибок измерений.

Ток или напряжение?

В принципе, для управления источником тока можно использовать как ток нагрузки, так и напряжения на ней. В некоторых твердотельных усилителях мощности можно встретить такое решение. Но это утверждение справедливо только в одном случае - если нагрузка имеет активный характер.

Общеизвестно, что реактивный характер нагрузки (большинство реальных нагрузок такими и есть) каскада превращает нагрузочную линию в эллипс. Управление источниками тока по напряжению на нагрузке приводит к тому, что искажение нагрузочной кривой происходит значительно быстрее, чем в классическом каскаде.

В общем, это понятно – фазовые сдвиги между током и напряжением на нагрузке приводят к нарушению режима компенсации, развороту нагрузочной линии и ухудшению параметров каскада. На рисунке 5 показан эффект от включения маленькой индуктивности в цепь нагрузки. Верхний график соответствует управлению по току нагрузки, нижний – по напряжению.

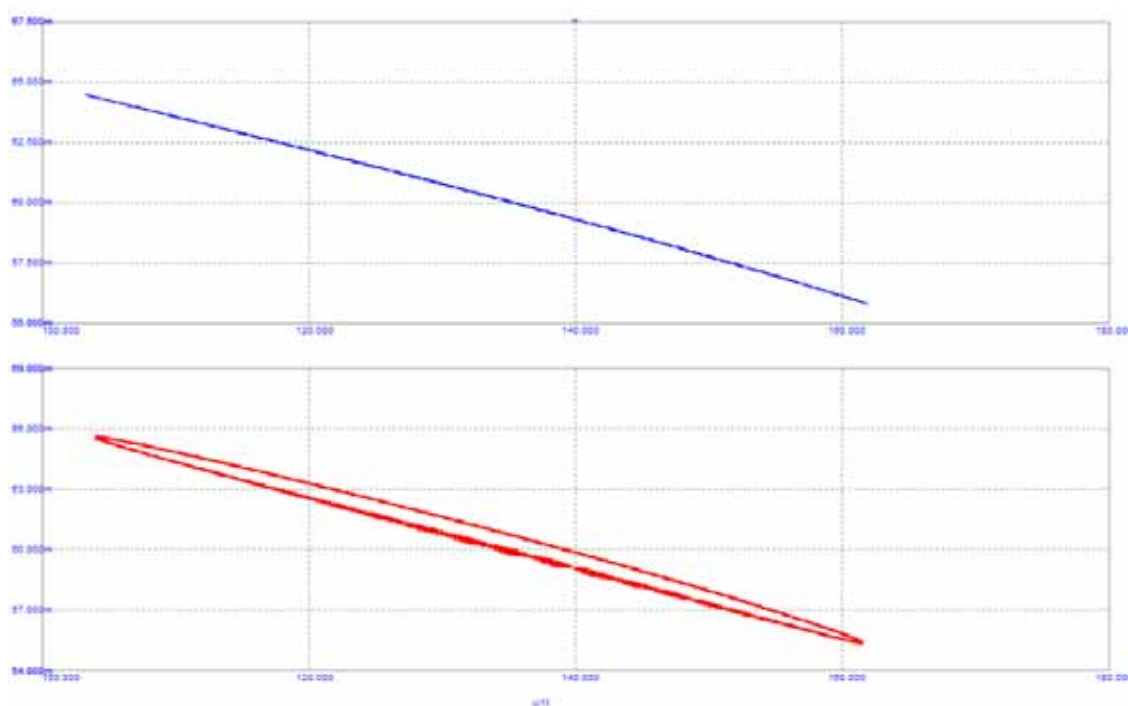


Рисунок 5

При реактивной нагрузке, если источник тока управляется током нагрузки, то ESE каскад практически ничем не отличается по поведению от классического каскада.

Где спряталась обратная связь?

Формально анализируя структуру каскада, можно сказать, что в каскаде присутствует местная обратная связь по току нагрузки. Но механизм действия этой ОС существенно отличается от механизма действия классической ОС. Классическая интерпретация предполагает векторное суммирование входного сигнала с выходным и подачи суммарного сигнала на вход усилителя. В данном случае этого нет, сигнал ОС воздействует непосредственно на параметры нагрузочной линии лампы. Честно говоря, я бы даже воздержался от употребления термина «обратная связь». Вывод основных соотношений, определяющих параметры каскада в зависимости от K , далеко выходит за рамки этой статьи, и поэтому ограничимся характеристиками его влияния на каскад в зависимости от его значения.

- Выходное сопротивление каскада в основном определяется выходным сопротивлением лампы и мало зависит от коэффициента K .
- Коэффициент усиления каскада увеличивается с увеличением K и стремится к значению μ лампы при $K=1$.
- Частотные свойства каскада не зависят от величины K .
- Функция линейности каскада от величины K имеет экстремум. Точка экстремума зависит от выбранного режима лампы и ее характеристик.
- В каскаде отсутствует эффект обогащения спектра вне зависимости от величины K .

Техническая реализация

Хотя структурная схема каскада выглядит довольно устрашающе, один из вариантов его технической реализации получается довольно простым, я бы даже сказал – изящным. В качестве примера на рисунке 6 показан выходной каскад усилителя для головных телефонов.

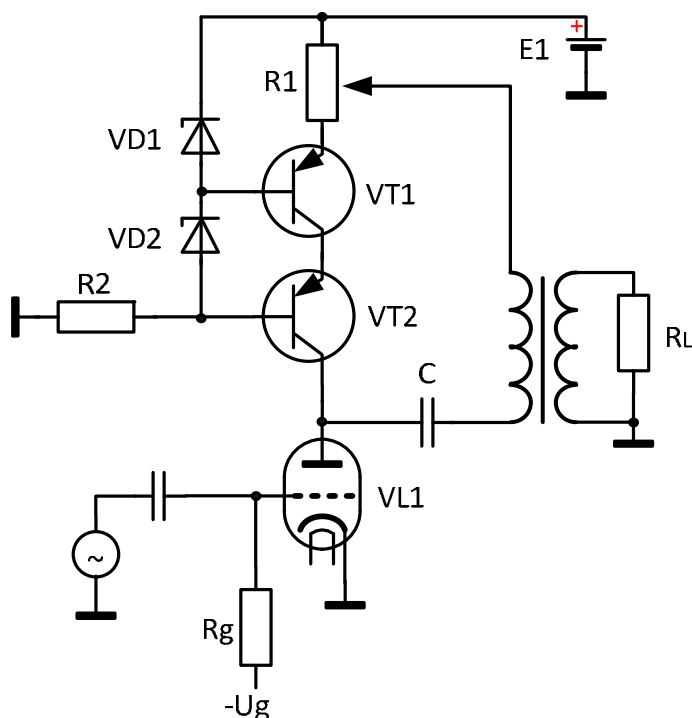


Рисунок 6

В анодную цепь мощного триода (6C19П) включен каскодный источник тока на транзисторах VT1, VT2. Нагрузка через разделительную емкость подключена к аноду лампы и к токозадающему резистору R1 источника тока. При отсутствии сигнала напряжение стабилитрона VD1 и резистор R1 задают ток покоя каскада. При появлении сигнала на входе ток сигнала начинает протекать через резистор R1 (резистор выполняет функции датчика тока). Появление дополнительного тока в этой цепи эквивалентно изменению номинала токозадающего резистора, что, соответственно, приводит к модуляции выходного тока источника тока. Изменяя положение движка резистора, можно изменять масштабный коэффициент K приблизительно в пределах $0 \div 0.9$, не изменяя тока покоя лампы. Теперь источник тока можно рассматривать и как усилитель с токовым входом и токовым выходом. Усилитель обладает достаточной линейностью, уровень искажений (при максимальном размахе выходного тока) не превышает долей процента и полосой, простирающейся до единиц мегагерц. Поэтому эффект компенсации сохраняется до частот, лежащих гораздо выше звукового диапазона частот, и частотные свойства всего каскада определяются исключительно трансформатором.

Собственно каскад имеет следующие параметры: выходная мощность – 1W, мощностная полоса 12Hz÷40kHz, коэффициент гармоник - ~0.8%. На рисунке 7 показан спектр искажений при выходной мощности 1 и 0.25 ватта.

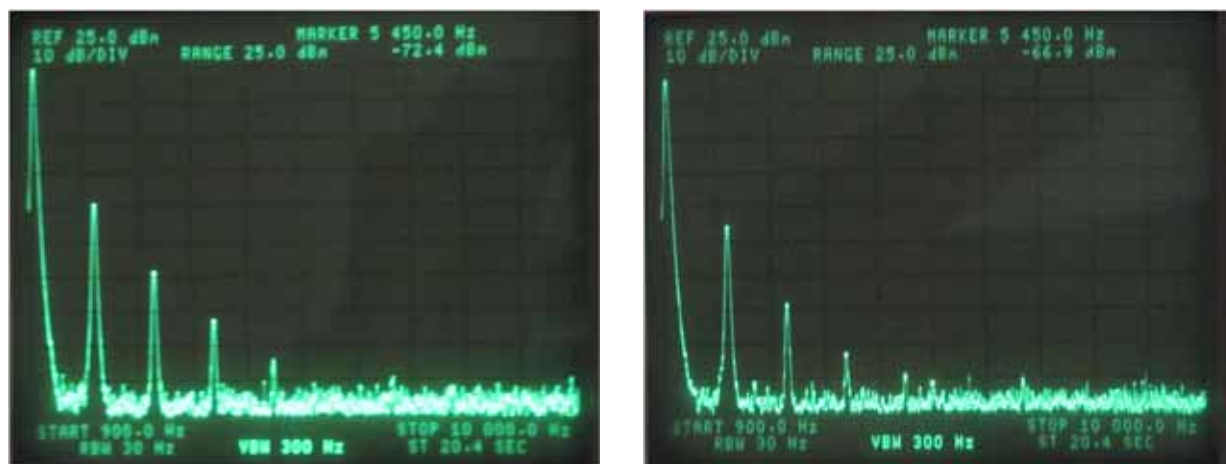


Рисунок 7

Каскад имеет совершенно типичный для одноконтурных схем спектр искажений: малое число гармоник и их быстрый спад, вторая гармоника - доминирующая. Уменьшение выходной мощности приводит к быстрому спаду уровней гармонических составляющих, высшие гармонические составляющие спадают быстрее.

Заключение

При прочих равных условиях использование ESE выходного каскада позволяет заметно повысить линейность усилителя и при этом сохранить характерные особенности звука одноконтурных схем. Каскад обладает лучшей переходной характеристикой по сравнению с классическим вариантом, и в нем меньше выражена асимметрия фронтов при усилении импульсных сигналов. В целом, звуковой «почерк» каскада определяется, в основном, именно лампой и ее режимом работы.

Несколько спорным моментом является работа трансформатора без подмагничивания. Но выбором соответствующего типа материала сердечника и, учитывая, что в тех же габаритах трансформатора можно получить индуктивность намагничивания в 1.5÷2 раза больше, можно значительно снизить негативное влияние нелинейного тока намагничивания сердечника.

На мой взгляд, очень важным преимуществом каскада является возможность гибкого управления режимом работы в широких пределах для получения желаемого характера звука. В принципе, схемотехнику можно без особых проблем перенести и на полностью твердотельные устройства.