

# ГИБРИДНАЯ ЛАМПА

*Евгений Карпов*

В статье приведен анализ гибридного усилительного прибора на базе вакуумной электронной лампы и даны рекомендации по его использованию.

## Предыстория

Сразу хочу сказать уважаемым читателям, что сама идея не моя (к сожалению), а была подчерпнута из случайно увиденной схемы гибридного усилителя, приведенной на каком-то аудио форуме. Как это водится на русскоязычных форумах, местные «гуру» быстро поставили выскочку на место – и нет чистоты ламповых рядов, и работать будет криво, и вообще - полная глупость. В общем, затоптали человека, как стадо испуганных новыми воротами баранов.

Возможно, что техническая реализация и не была идеальной, но идея, сама идея – показалась мне очень интересной и перспективной. К сожалению, на момент просмотра мною этой темы, там не было какой-либо информации о первоисточниках и внятного описания принципа работы. А судя по вялым попыткам автора отбиться от местных «гуру», он сам не очень понимал, как это работает. Через какое-то время я благополучно забыл, и как тема называлась, и что это был за форум. Но идея мне покоя не давала, а поиски во всемирной паутине (правда, без фанатизма) первоисточников и анализа работы результатов не дали. В общем, я решил анализом заняться сам.

## Анализ на «пальцах»

Сама идея и, собственно, схема использованная для анализа показаны на рисунке 1. Параллельно лампе (назовем ее – лампа модель) включается источник тока, управляемый током самой лампы, с масштабным коэффициентом  $K$ .

Для анализа да и для понимания удобно рассматривать схему как трехполюсник с электродами  $A_h$ ,  $Ch$ ,  $G_h$ , которые будут соответствовать аноду, катоду и сетке новой эквивалентной гибридной лампы. Таким образом, ток, втекающий в анод нашего гибрида, будет суммой токов нашей лампы модели и тока источника тока, а напряжение между анодом и катодом гибрида будет определяться только характеристиками лампы модели. Если теперь всю беллетристику перевести в формальное русло и связать параметры гибрида с параметрами лампы модели, то, опуская все промежуточные выкладки, мы получим следующие соотношения:

$$S_h = S \times (K + 1)$$

$$R_h = \frac{R}{K + 1}$$

$$\mu_h = \mu$$

Где:  $S$ ,  $R$ ,  $\mu$  - крутизна, внутреннее сопротивление и усиление лампы модели, а  $S_h$ ,  $R_h$ ,  $\mu_h$  - соответственно, параметры гибрида.  $K$  - масштабный коэффициент источника тока.

Проще говоря, гибридная лампа точно копирует форму анодных характеристик лампы модели с измененным масштабом по току анода, так как операция умножения линейна. Для иллюстрации вышесказанного на рисунке 2 приведены анодные характеристики лампы модели и гибрида на ее основе.

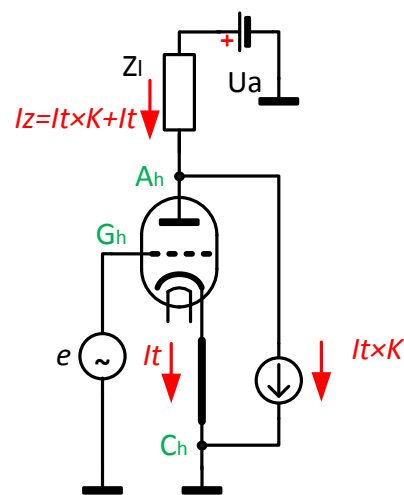


Рисунок 1

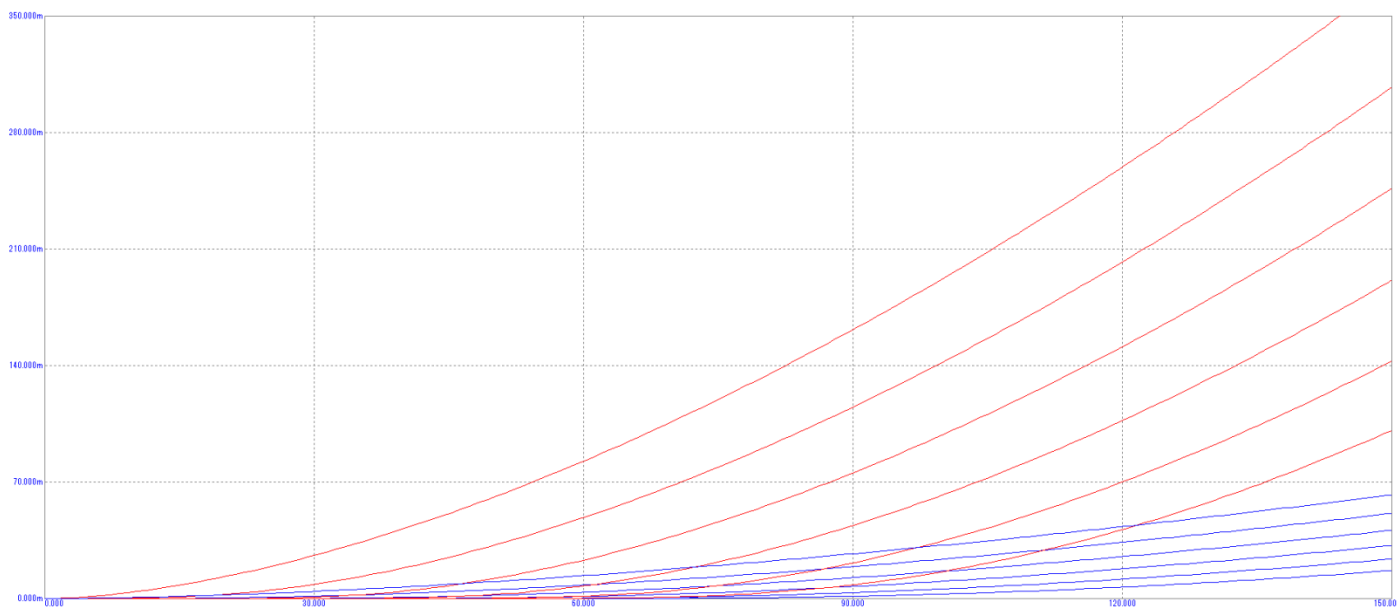


Рисунок 2

Красные линии соответствуют току анода гибридной лампы, а синие – лампы модели.

Получившийся гибрид может работать почти во всех режимах, используемых в линейных ламповых усилителях. Есть некоторая неясность при работе лампы с токами сетки, что-то у меня уравнения не решаются. Но так как маломощные лампы очень редко используются в таких режимах в линейных схемах, вопрос был отложен в долгий ящик ввиду его неактуальности.

### Что мы с этого можем иметь?

Вот бы берем наш любимый триод со своей неповторимой звуковой сигнатурой и используем его как модель в гибридной лампе. Теоретически, мы получаем его аналог с ничем не ограниченной мощностью рассеяния на аноде и теперь используем в выходном каскаде. В общем, получаем полную аудиофильскую нирвану.

Но это теоретически, практически – возникает ряд проблем. Первый и самый сложный вопрос - это управляемый источник тока и его погрешности. В принципе, используя современную элементную базу, можно реализовать источник тока, приближающийся по параметрам к идеальному. Второй вопрос - это выбор кандидата на лампу модель. Дело в том, что использовать гибридную лампу интересно именно в выходном каскаде, и понятно, что лампа будет работать при большом размахе переменной составляющей на аноде. Не все маломощные лампы относятся к этому благосклонно, надо подбирать лампы, имеющие большой раскрыт анодных характеристик. Это несколько ограничивает возможный выбор претендентов.

Но даже с учетом ограничений на выбор типа лампы модели, список ламп, пригодных для использования в выходном каскаде, значительно расширяется. Есть еще и побочный эффект - довольно большой коэффициент усиления у выходного каскада на гибридной лампе, что сильно облегчает построения драйвера и позволяет сократить длину тракта до минимума. В пределе, при большом уровне выхода источника, это может быть только один выходной каскад.

Так как мы это гибридное устройство привели к эквивалентной лампе, то, следовательно, для расчетов пригодны все стандартные методики, используемые для расчетов ламповых каскадов. И

имея анодные характеристики лампы модели, можно без особых сложностей получить характеристики гибрида, просто умножив все значения тока на коэффициент  $K+1$ .

Весьма приятным свойством гибридной лампы является и ее пониженное выходное сопротивление, что существенно упрощает реализацию выходного трансформатора.

### Практическая реализация

Чтобы убедиться в правильности теоретических выводов, я собрал макет выходного каскада на гибридной лампе (рисунок 3). Еще меня очень интересовал вопрос, связанный с возможным расширением спектра искажений вверх. Так как источник тока будет твердотельным, то такая опасность существовала. Для экспериментов я выбрал лампу 6Н6П. Не мудрствуя лукаво, я решил реализовать источник тока по классической схеме с ОУ, но учитывая значительный размах переменной составляющей, схема была немного модернизирована до «каскадного» варианта. И вполне сознательно был выбран не супер-пупер аудиофильский ОУ, а старый добрый NE5534 с умеренным быстродействием и хорошей линейностью.

В схеме не показаны вспомогательные элементы – типа расфильтровки питания и защиты, но их наличие предполагается.

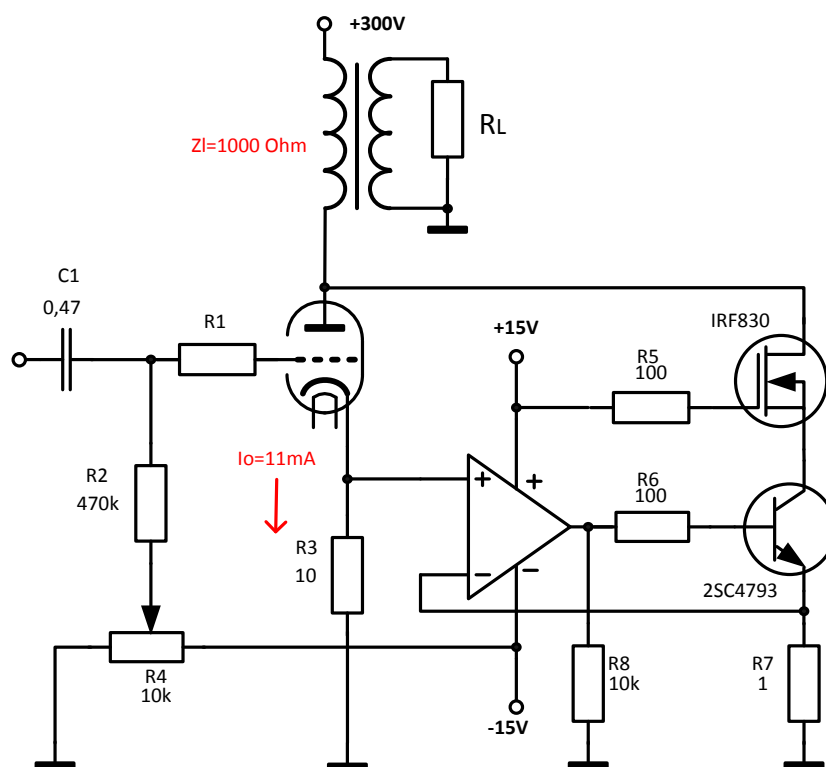


Рисунок 3

Для лампы используется фиксированное смещение, датчиком тока лампы является резистор R3, масштаб тока задается отношением резисторов R3 и R7. Так как сопротивление R3 на два порядка меньше сопротивления анодной нагрузки, то возникающей местной ОС можно пренебречь.

Объективно измеренный коэффициент усиления каскада (без учета коэффициента трансформации) равен 12, выходное сопротивление – 320 Ом.

Что удовлетворительно согласуется с предварительно измеренными параметрами лампы. Выбор приведенного сопротивления нагрузки зависит от задач. Я сначала ориентировался на выходную мощность около 3 ватт, но выяснилось, что каскад может отдать большую мощность, так что выбранное значение - какой-то компромисс между выходной мощностью и уровнем искажений. Полоса каскада на 99% определяется параметрами выходного трансформатора, без его учета – полоса снизу ограничена разделительной емкостью С1, а сверху достигает 200 килогерц без существенного ухудшения спектра искажений.

Графики зависимостей уровня гармоник и общих искажений от мощности приведены на рисунках 4 и 5 соответственно.

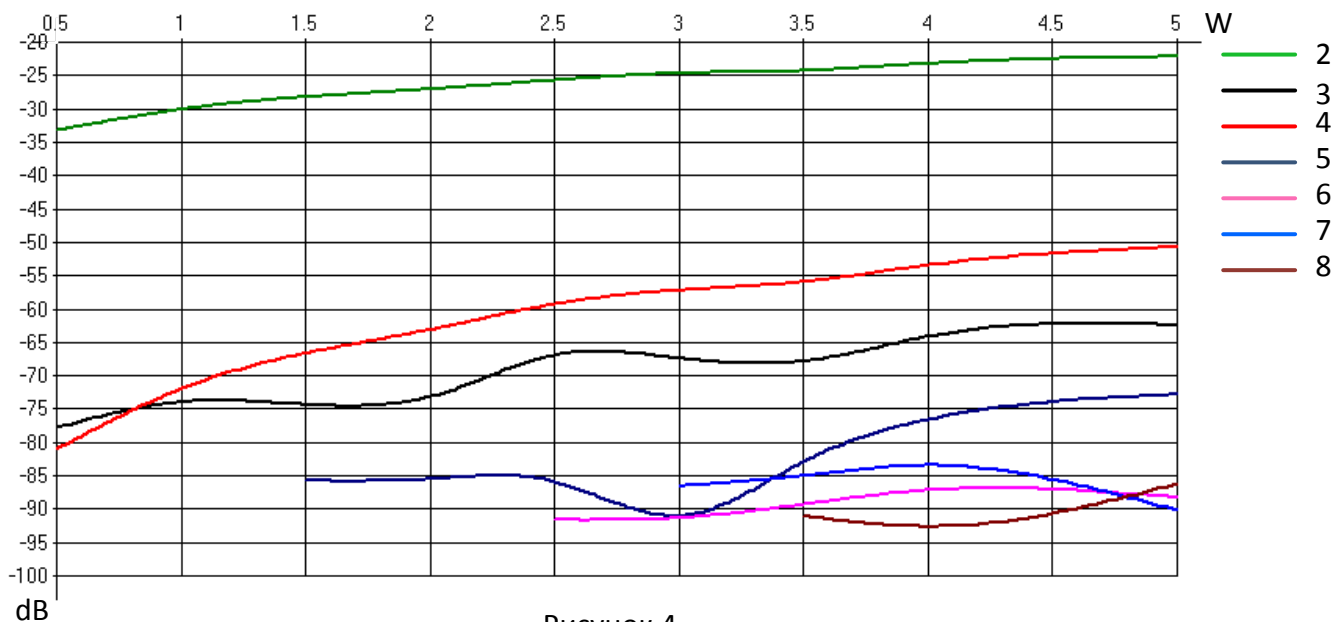


Рисунок 4

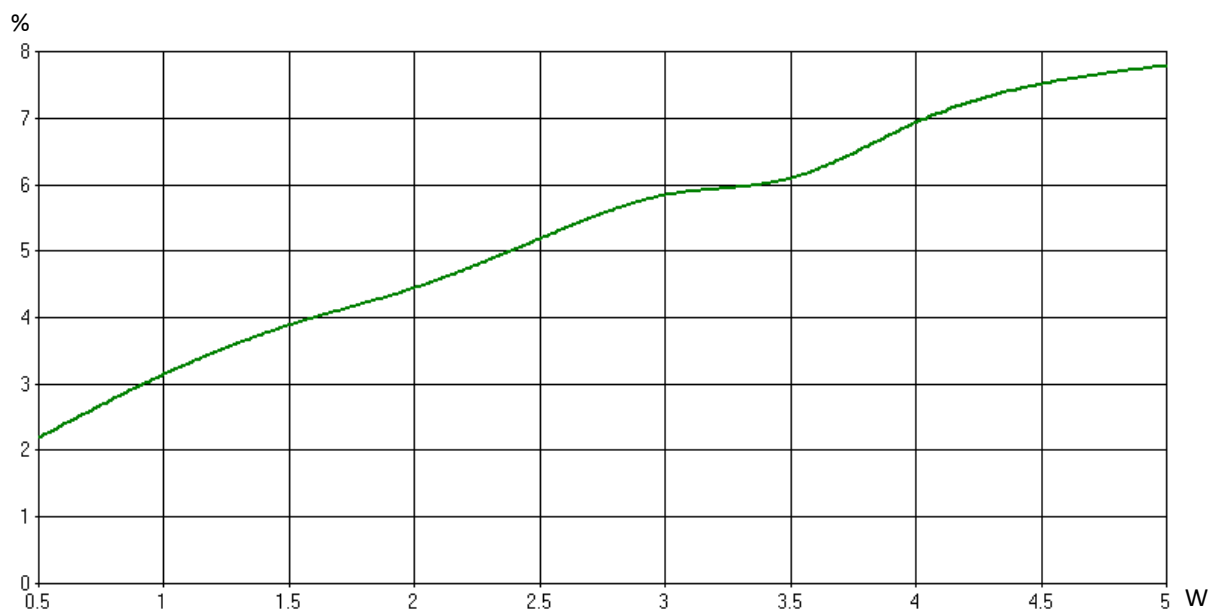


Рисунок 5

Весьма любопытно распределение гармонических составляющих: что радует, что твердотельный источник практически не дал высших гармоник. Если сравнить со спектром искажений при классическом включении лампы, то получаем приблизительно аналогичную картинку. Но тут возникает вопрос, что брать за исходные данные для сравнения. Я брал получающийся спектр при одинаковых размахах переменной составляющей на аноде при пересчитанной приведенной нагрузке.

Взяв за основу сравнения критерий масштабированной мощности, получим совершенно другую картину. Я посчитал, что правильнее опираться именно на размах переменной составляющей. Если непосредственно сравнивать магнитуды гармоник, то четные гармоники при классическом включении получаются немного меньше, а нечетные – больше, разница: в пределах нескольких децибел. И если рост четных гармоник теоретически можно обосновать, то вот механизм уменьшения нечетных гармоник мне не совсем ясен. Здесь вопрос требует дальнейшего исследования. Да и вообще, адекватность такого сравнения вызывает некоторые сомнения.

В общем, если посмотреть на спектр искажений, то каскад прямо просится в симметричную двухтактную схему. Так что в планах у меня появился пункт реализации такого полнофункционального двухтактного усилителя.

Если вернуться к одноктактным схемам, то относительно недавно у меня была возможность достаточно обстоятельно обследовать одноктактный усилитель на 6П44С со всеми аудиофильскими ухищрениями и наворотами. У него был очень похожий характер вносимых искажений при сравнимой мощности, и у меня такое ощущение, что и характер звука будет аналогичным. В общем, оба будут красиво врать.

## **Заключение**

Если подвести итог, то вопрос не изучен до конца, так что у всех желающих есть возможность продолжить исследования. Ну и вопрос оптимального построения управляемого источника тока тоже открывает широкие возможности для творчества и экспериментов.

Хочу немного коснуться вопросов проектирования и расчета каскада на гибридной лампе. Во-первых, еще раз напомнить о необходимости тщательного подбора типа для лампы модели. Во-вторых, сам процесс проектирования целесообразно разбить на две части. Сначала определить оптимальные режимы для лампы модели при больших размахах напряжения на аноде, следующим шагом выбрать коэффициент масштабирования и получить новые характеристики, а потом уже производить окончательный расчет каскада традиционными методами.